

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA Y PÉRDIDAS EVAPORATIVAS DE UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO FLOTANTE E HIDROELÉCTRICO EN EL ECUADOR

### MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN DE AGUA EN RESERVORIOS HIDROELÉCTRICOS CUANDO TIENEN PANELES FOTOVOLTAICOS EN SU SUPERFICIE

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

CHRISTIAN ANDRÉS ALBÁN PROAÑO

[christian.alban@epn.edu.ec](mailto:christian.alban@epn.edu.ec)

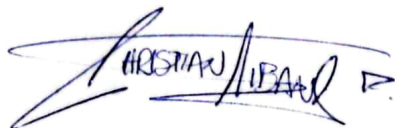
DIRECTOR: SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

[santiago.vaca@epn.edu.ec](mailto:santiago.vaca@epn.edu.ec)

DMQ, agosto 2022

## CERTIFICACIONES

Yo, CHRISTIAN ANDRÉS ALBÁN PROAÑO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'CHRISTIAN ALBÁN PROAÑO', written over a horizontal line.

**CHRISTIAN ANDRÉS ALBÁN PROAÑO**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CHRISTIAN ANDRÉS ALBÁN PROAÑO, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Santiago David Vaca Jiménez', written over a horizontal line.

**SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CHRISTIAN ANDRÉS ALBÁN PROAÑO

SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

## DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelito Oswaldo quien me inspiró a seguir adelante, fue un pilar fundamental en mi vida, siempre estarás presente en mis recuerdos y corazón, por eso te dedico este trabajo.

A mi madre Nancy, que con su esfuerzo, sacrificio y apoyo me ayudó a conseguir esta meta. A mi abuelita Olga, por su ayuda y sus cuidados, sin ti nada de esto sería posible.

A todas las personas que han sido parte de este camino, que me apoyaron cuando más los necesitaba y creyeron en mí.

Finalmente quiero dedicarme este proyecto y todo su trayecto a mí mismo, por seguir adelante, superarme a pesar de las adversidades y no rendirme hasta lograr lo que algún día parecía inalcanzable.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia, a mi madre y abuelitos por su paciencia, consejos y regaños que me brindaron para no desviarme del camino y apoyarme para llegar a concluir esta etapa gratificante. A todas mis tías/os y primas/os, especialmente a mi tía Alis, por ser un apoyo incondicional y estar presta a ayudarme en cualquier circunstancia.

A Daniela con quien, a pesar de tener componentes distintos del proyecto siempre estuvo cuando la necesité, dispuesta a darme una mano y brindarme su apoyo.

A mis amigos de “las chicas y el químico” con los cuales compartimos grandiosos e inolvidables momentos dentro y fuera de la universidad.

Al Ing. Santiago Vaca por darnos la oportunidad de trabajar en este proyecto y depositar su confianza en nosotros, por brindarnos su tiempo, ayuda y guía para desarrollar cada etapa de esta tesis.

A Vale y May, quienes me brindaron su amistad incondicional, me respaldaron, aconsejaron y cuidaron. Gracias por haber formado parte de este proceso.

Finalmente, a la Escuela Politécnica Nacional y la Facultad De Ingeniería Mecánica que me vio crecer y me formó, a sus docentes que compartieron sus conocimientos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general .....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Alcance .....	1
1.4 Marco teórico .....	2
2 METODOLOGÍA.....	7
2.1 Comparativa entre modelos de evaporación de literatura.....	7
2.2 Selección y definición de modelos .....	7
2.3 Análisis Paramétrico.....	12
2.4 Traslado de los modelos matemático a Matlab para superficies libres y parcialmente cubiertas con FPV .....	13
2.5 Área de estudio .....	13
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	15
3.1 Resultados .....	15
3.2 Discusión.....	20
Conclusiones .....	22
Recomendaciones .....	23
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	24
ANEXOS .....	27

## RESUMEN

El agua es un recurso de vital importancia para la humanidad. Se utiliza como agua potable, para irrigar cultivos y tiene fines sanitarios e industriales. El cambio climático puede alterar la disponibilidad de este recurso. Últimamente hay un interés en evaluar la interacción de las cuencas hidrográficas parcialmente cubiertas con sistemas fotovoltaicos flotantes ya que una manera de lograr un óptimo uso del agua y determinar su disponibilidad, es fundamental conocer la tasa de evaporación de los cuerpos de agua.

La estimación de la evaporación de la superficie del agua generalmente se realiza a través de medidas directas o utilizando modelos matemáticos que requieren el conocimiento de algunos parámetros climáticos.

El presente estudio modela y analiza la reducción de pérdidas evaporativas debido al efecto de sistemas fotovoltaicos flotantes cubriendo parcialmente el reservorio de la hidroeléctrica de Mazar. Se detalla 6 modelos de literatura para superficie libre y un modelo derivado del método de Penman para superficies cubiertas que se basa en función del balance energético en la superficie del agua. Los resultados de este trabajo muestran que la cantidad de agua evaporada no solo depende del porcentaje de superficie cubierta, sino también de las características del sistema flotante instalado. Si solamente se cubre el 30% de la superficie del reservorio, es posible reducir las pérdidas evaporativas hasta un 37.48% con sistemas del tipo suspendidos y 67.96% con la clasificación tipo flotante.

**PALABRAS CLAVE:** evaporación, sistemas fotovoltaicos flotantes, reservorio hidroeléctrico, energía hidroeléctrica.

## ABSTRACT

Water is a vitally important resource for humanity. It is used as drinking water, to irrigate crops and has sanitary and industrial purposes. Global warming may alter the availability of this resource. Lately there is an interest in evaluating the interaction of partially covered water basins with floating photovoltaic systems, since one way to achieve optimal use of water and determine its availability, it's essential to know the rate of water evaporation.

The estimation of evaporation from the water surface is usually done through direct measurements or using mathematical models that require knowledge of some weather parameters.

This study models and analyzes the reduction of evaporative losses due to the effect of floating photovoltaic partially covering the Mazar hydroelectric reservoir. Six literature models for free surface and a model derived from the Penman method for covered surfaces that is based on the energy balance on the water surface are detailed. Six literature models for free surface and a model derived from the Penman method for covered surfaces that is based on the energy balance on the water surface are detailed. The results of this work show that the amount of water evaporated not only depends on the percentage of surface covered, but also on the characteristics of the installed floating photovoltaic system. If only 30% of the reservoir surface is covered, it is possible to reduce evaporative losses up to 37.48% with suspended type systems and 67.96% with the floating type classification.

**KEYWORDS:** evaporation, floating photovoltaics systems, hydroelectric reservoir, hydroelectric power.



# **1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

Este trabajo forma parte de un proyecto que cuantifica la generación eléctrica y evaporación debido a sistemas fotovoltaicos flotantes. Dentro de este componente, se aborda la estimación de las pérdidas evaporativas al interactuar con sistemas fotovoltaicos flotantes y su reducción al compararlas con la evaporación de la superficie libre del agua, todo esto a través de modelos matemáticos de literatura y aplicado al reservorio de la hidroeléctrica de Mazar.

## **1.1 Objetivo general**

Evaluar la aplicabilidad de los modelos de evaporación de agua en los reservorios hidroeléctricos con sistemas fotovoltaicos flotantes en el Ecuador.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar y sintetizar la información especializada sobre el uso de sistemas fotovoltaicos flotantes y su interacción con los reservorios hidroeléctricos.
2. Realizar un análisis comparativo entre los modelos matemáticos existentes de evaporación con y sin paneles fotovoltaicos flotantes.
3. Utilizar los modelos estudiados para estimar la evaporación de agua en un reservorio hidroeléctrico en la sierra ecuatoriana para observar las diferencias numéricas en la estimación de la evaporación.
4. Realizar un estudio paramétrico de los modelos antes estudiados, con el propósito de observar cuales son los parámetros de instalación y operación de los paneles fotovoltaicos flotantes que más influyen en la disminución de las pérdidas evaporativas.

## **1.3 Alcance**

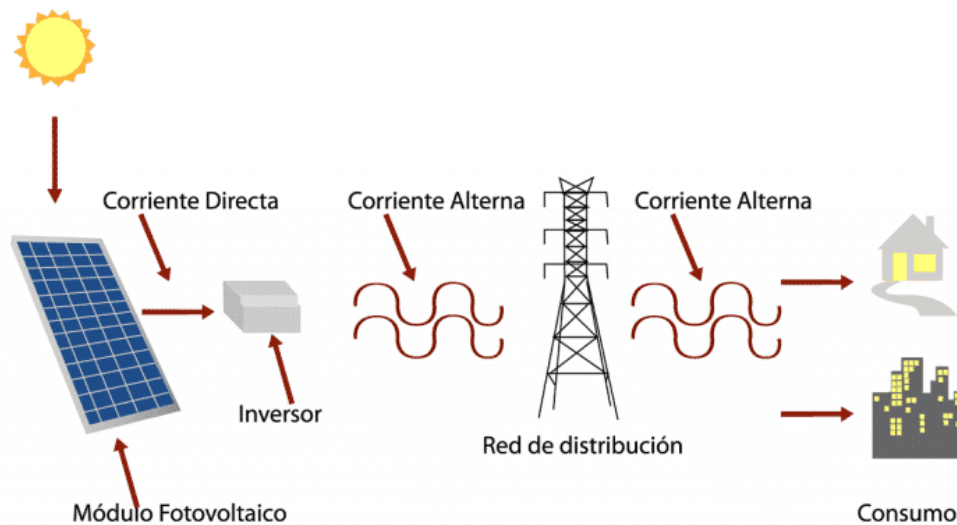
Este proyecto de Integración Curricular comienza con un compendio de bibliografía relacionada a cada aspecto a tratar en el marco teórico, luego de esto se definirá un modelo matemático apropiado a partir de una comparación realizada entre los métodos encontrados en literatura especializada. Posteriormente se hará una estimación de la disminución de las pérdidas evaporativas con sistemas fotovoltaicos flotantes en los reservorios de agua en condiciones normales y finalmente se llevará a cabo un estudio paramétrico para determinar las variables más influyentes en esta reducción de pérdidas.

## 1.4 Marco teórico

### Energía solar fotovoltaica

El desarrollo e implementación de nuevas fuentes de energía renovables que sean respetuosas y amigables con el medio ambiente han venido implementándose desde ya hace varios años (CONELEC, 2022). Una de estas nuevas fuentes, considerada una gran opción para ayudar a satisfacer la demanda energética, es la energía solar fotovoltaica. Esta utiliza paneles fotovoltaicos para producir energía eléctrica de manera directa a partir de la radiación solar. Los paneles fotovoltaicos están conformados por celdas fotovoltaicas (SocialEnergy, 2021).

La generación de electricidad se basa en el efecto fotovoltaico, por el cual al momento de incide la radiación solar sobre los paneles, una parte de esta se absorbe y produce una diferencia de potencial, generándose así una corriente eléctrica continua la cual se traslada hasta el inversor que se encarga de transformarla en corriente alterna hasta los sistemas de transmisión, en caso de estar conectada a la red, así como se observa esquemáticamente en la Figura 1.1 (SocialEnergy, 2021).



**Figura 1.1.** Funcionamiento de una planta fotovoltaica

**Fuente:** SocialEnergy (2021)

La ubicación geográfica de Ecuador goza de un alto potencial para la generación de este tipo de energía. Esto debido a que en nuestro país existen zonas que cuentan con hasta 6.3 horas de luz perpendicular, según el CONELEC (2008). Se estima que una planta de generación eléctrica de este tipo es factible cuando tiene, en promedio, 5.2 horas de luz solar perpendicular (Aulestia L & Celi M, 2017).

## Evaporación en embalses hidroeléctricos

Los reservorios de agua representan una importante herramienta para gestionar los recursos hídricos ya que permiten almacenar agua por largos periodos de tiempo (Assouline et al., 2011). Sin embargo, grandes cantidades de volumen de agua se pierden de los reservorios debido a la evaporación (Waheeb Youssef & Khodzinskaya, 2019).

En la Figura 1.2 se puede observar un análisis realizado por FAO (n.d.) en la cual muestra la evaporación global de presas hidroeléctricas clasificada por regiones, estimando un total alrededor de  $150 \text{ km}^3$  de evaporación acumulada para Sudamérica, América Central y el Caribe.

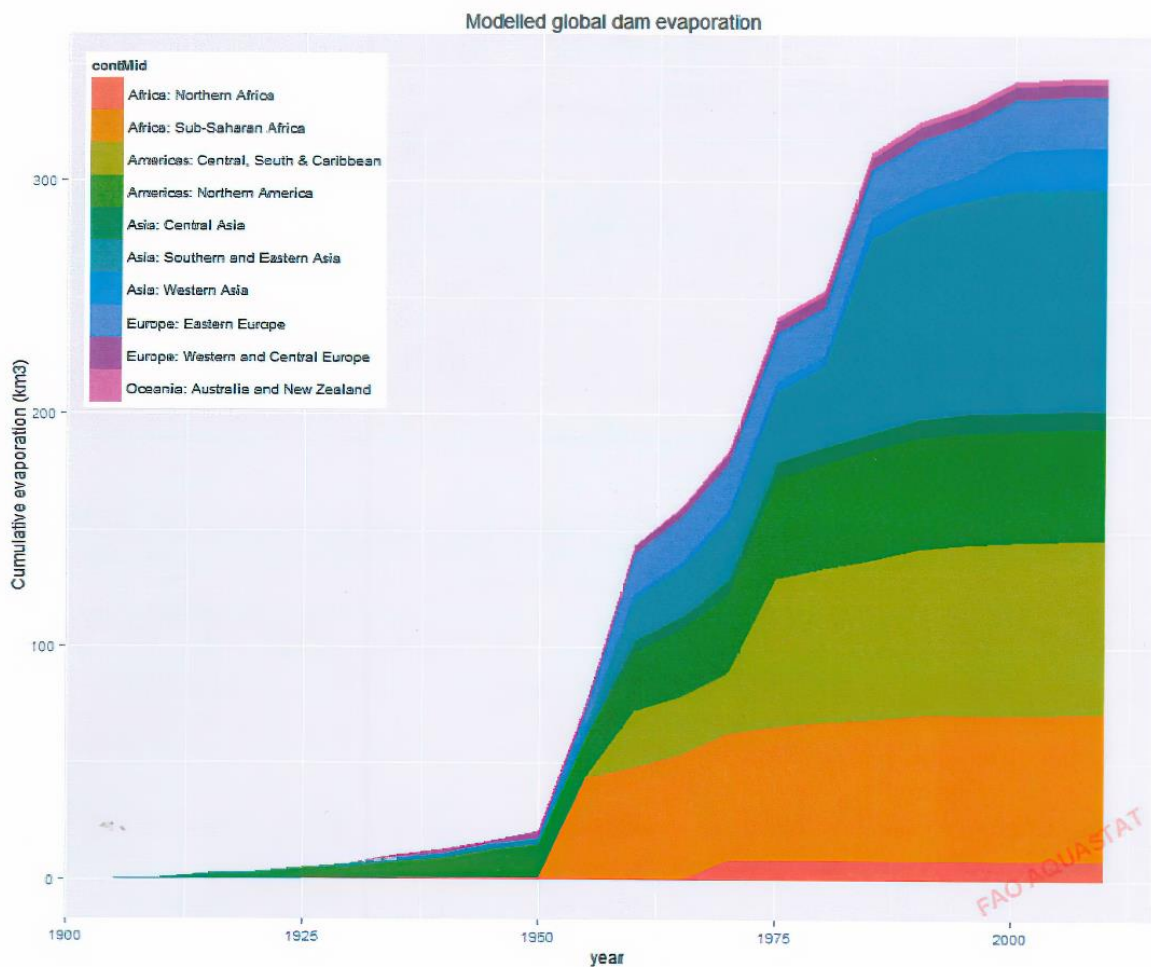


Figura 1.2. Evaporación acumulada por regiones

Fuente: FAO (n.d.)

Las pérdidas por evaporación de agua en los reservorios hidroeléctricos pueden reducir severamente la capacidad hidroeléctrica de la planta y en consecuencia su productividad. Esta evaporación del agua está relacionada de una manera directa con la superficie del agua expuesta a la intemperie, la radiación solar, la temperatura del ambiente, la humedad

de la región y las condiciones del viento. Desafortunadamente, se espera que la evaporación sea más grande en un futuro, debido al incremento de las temperaturas por el cambio climático (Zhingre, 2022).

## Componentes de la Radiación Solar

### Radiación extraterrestre

Es la radiación del sol que se recibe diariamente en un plano normal al sol ubicado en la parte superior de la atmósfera. Esta radiación cambia a lo largo del año debido a la trayectoria de la tierra alrededor del sol (Sandia National Laboratories, n.d.).

### Radiación Normal Directa

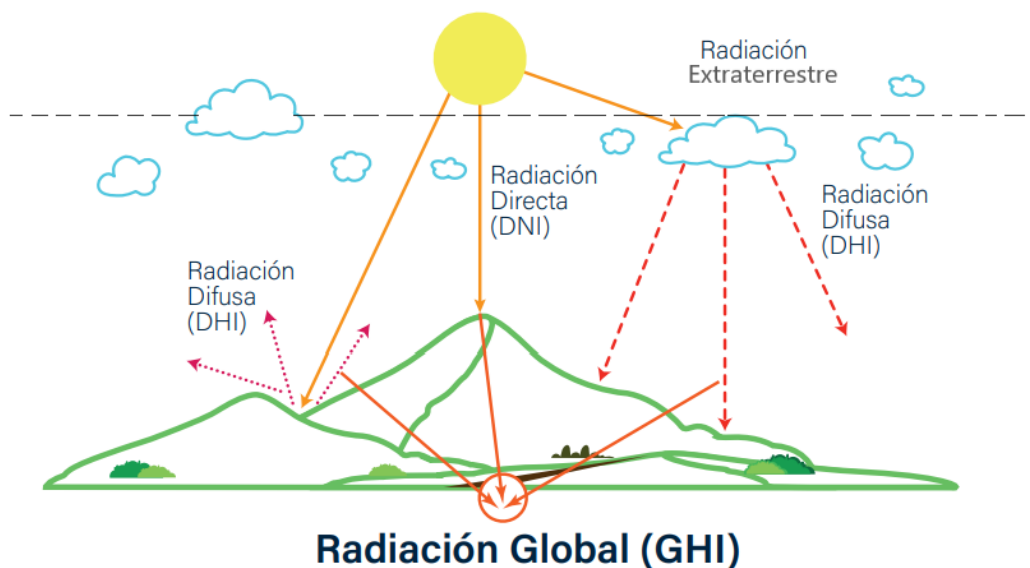
Se conoce como radiación normal directa aquella que atraviesa la atmosfera terrestre sin ningún tipo de interacción (SCINERGY, 2019).

### Radiación Horizontal Difusa

La radiación horizontal difusa es la que ha sido redireccionada, dispersada ya sea por la superficie de la tierra o la atmósfera (SCINERGY, 2019).

### Radiación Global Horizontal

La suma de los componentes de la radiación horizontal difusa y la normal directa se conoce como la radiación global horizontal (SCINERGY, 2019). Las componentes de la radiación mencionadas se pueden observar esquemáticamente en la Figura 1.3.



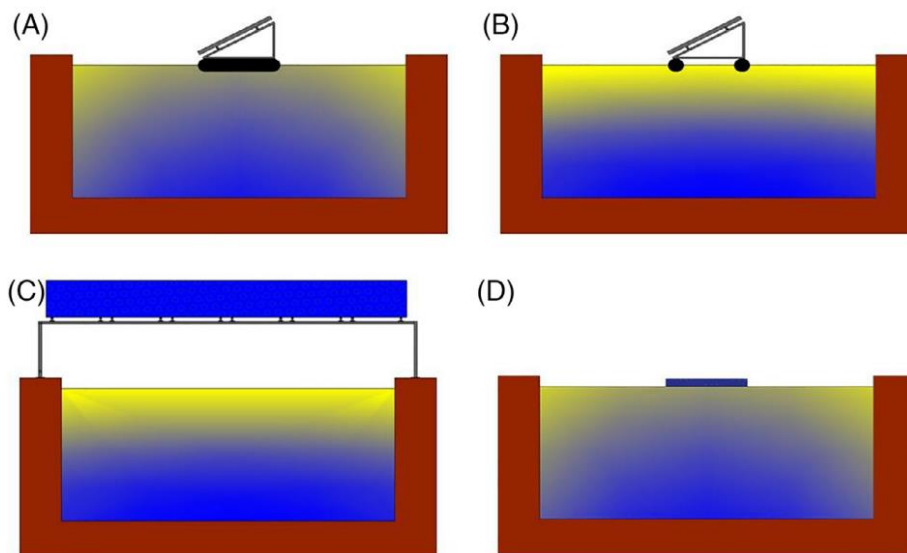
**Figura 1.3.** Componentes de la radiación solar

**Fuente:** SCINERGY (2019)

## Sistemas fotovoltaicos flotantes

Los sistemas fotovoltaicos flotantes (*FVP*) son una alternativa a los sistemas convencionales. En lugar de ser instalados en tierra firme, estos sistemas pueden ser instalados en superficies de agua, como embalses hidroeléctricos, lagos, canales de riego o cuencas hidrográficas. Por lo general, estos sistemas fotovoltaicos alternativos son integrados con centrales hidroeléctricas porque se puede sacar una doble ventaja: reducción de la evaporación, que equivale a un aumento del potencial hidroeléctrico y producción de energía fotovoltaica (Bontempo Scavo et al., 2019).

Los beneficios de colocar módulos solares en cuerpos de agua incluyen un mayor rendimiento económico, una mejor eficiencia de producción al disminuir la temperatura de los módulos debido al efecto de enfriamiento evaporativo de las células fotovoltaicas de los paneles solares, menor evaporación del agua y mejora la calidad del agua ya que reduce la proliferación de algas (Nathalie Alcántara, 2018).



**Fuente:** Bontempo Scavo (2019)

**Figura 1.4.** Tipos de sistemas fotovoltaicos flotantes

La Figura 1.4 muestra la clasificación de los sistemas fotovoltaicos flotantes según Scavo (2020). Los sistemas suspendidos (Figura 1.4 B, C) no se encuentran en completo contacto con la superficie del agua, por lo que obstruyen la incidencia de la radiación solar directa, pero no del componente difuso, que puede alcanzar la superficie del agua debajo del módulo fotovoltaico debido a que este componente de la radiación es redireccionada, dispersada por la superficie de la tierra. Los sistemas flotantes (Figura 1.4 A, D) están en contacto con la superficie del agua y no permiten que la radiación solar incida sobre la superficie del agua donde están instalados (Scavo et al., 2020).

## Modelos de evaporación

Desde hace varias décadas se han desarrollado varios métodos empíricos para estimar la tasa de evaporación de la superficie libre en los cuerpos de agua. Para superficies de agua libre generalmente se suelen utilizar los siguientes métodos.

**Métodos Teóricos.** - Se basan en los principios de balance de energía y balance hídrico (conservación de la masa).

- Balance hídrico: es la aplicación de la conservación de la masa a una parte del ciclo hidrológico a la cual se le establece una igualdad entre las salidas y entradas (Mariana Achad, 2019).
- Balance de energía: considera el intercambio de energía desde la superficie evaporante. La porción de agua que se evaporará depende principalmente de la cantidad de energía disponible (Juncosa, 2007).

### Método Combinado

El modelo de Penman se puede considerar como estándar dentro de los métodos combinados (Hernandez & Santana Pérez, 2008). En 1948, combinó la transferencia de masa y el balance de energía para obtener una ecuación para estimar la evaporación de una superficie descubierta de un cuerpo de agua, esto simplifica los cálculos, ya que elimina la necesidad de la temperatura del agua como dato de entrada. Algunos de los modelos que se fundamentan en el método combinado se derivan de la ecuación de Penman (Bontempo Scavo et al., 2019).

En cuanto a la estimación de la evaporación en reservorios de agua que se encuentran cubiertos con sistemas fotovoltaicos flotantes faltan estudios de literatura que investiguen la interacción entre estos sistemas y los cuerpos de agua.

Según Bontempo Scavo (2019), el cual propone una metodología para estimar la reducción de las pérdidas por evaporación cuando están presentes sistemas fotovoltaicos flotantes ( $EVM_{FPV}$ ), los modelos matemáticos se basan principalmente en los métodos para superficie de agua libre ( $EVM_{free}$ ) que utilizan la temperatura del agua como variable de entrada, este valor de forma general es un dato de difícil conocimiento por lo que se suele utilizar la temperatura ambiente para reemplazar este dato de entrada (Scavo et al., 2020).

La principal diferencia con los  $EVM_{free}$  consiste en incluir la diferente cantidad de radiación solar que incide en la superficie del agua, lo que a su vez es función del tipo de sistema fotovoltaico flotante (Scavo et al., 2020).

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Comparativa entre modelos de evaporación de literatura

Se realiza un análisis comparativo entre cada uno de los modelos de evaporación para superficies libres, y los modelos matemáticos encontrados para superficies parcialmente cubiertas con sistemas flotantes.

Para ello se debe:

1. Realizar una revisión bibliográfica especializada en modelos de evaporación.
2. Identificar cada uno de los métodos y la metodología a seguir para obtener la estimación.
3. Definir las características, ecuaciones y variables de entrada de cada modelo matemático.

### 2.2 Selección y definición de modelos

Una vez comparados los modelos matemáticos de evaporación, se ha seleccionado varios métodos para superficies de agua libre y los modelos matemáticos propuestos para superficies cubiertas con *FPV*.

Los modelos evaporativos escogidos para estimar la evaporación en superficies de agua libre se seleccionaron en base a los métodos más utilizados en artículos científicos, tesis y demás bibliografía, además de las variables de entrada y la disponibilidad para conseguir dichos datos. A continuación, se detalla las respectivas ecuaciones y la simbología utilizada en cada método:

#### Modelo de Penman

La estimación de la evaporación según Penman se determina mediante la Ecuación 2.1 (Abdelal, 2021).

$$E = \frac{\nabla}{\nabla + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\nabla + \gamma} E_a$$

**Ecuación 2.1.** Modelo de Penman

Donde,  $E$  es la evaporación diaria [ $mm/d$ ],  $\nabla$  la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación [ $kPa/^\circ C$ ],  $\gamma$  es la constante psicrométrica [ $kPa/^\circ C$ ],  $R_n$  es la radiación neta efectiva [ $mm/d$ ],  $E_a$  es la cantidad de evaporación de una bandeja de Clase A [ $mm/d$ ].

Para calcular la radiación neta efectiva y para determinar la evaporación de una bandeja Clase A se requiere de cálculos adicionales los cuales están descritos desde la Ecuación 2.2 a la Ecuación 2.7 en el trabajo de Knook & Hogeboom (2016).

$$R_n = 0.00714 \cdot R_s + 5.26 \times 10^{-6} \cdot R_s \cdot (T_a + 17.8)^{1.87} + 3.94 \times 10^{-6} \cdot R_s^2 - 2.39 \times 10^{-9} R_s^2 (T_a - 7.2)^2 - 1.02$$

**Ecuación 2.2.** Radiación neta efectiva

$$e_s = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.27 T_a}{T_a + 237.3}\right)$$

**Ecuación 2.3.** Presión de vapor de saturación

$$e_a = RH * e_s$$

**Ecuación 2.4.** Presión de vapor actual

$$E_a = (e_s - e_a)^{0.88} (0.42 + 0.0029u)$$

**Ecuación 2.5.** Evaporación de una bandeja de clase A

$$\nabla = \frac{4098 * e_s}{(T_a + 237.3)^2}$$

**Ecuación 2.6.** Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación

$$\gamma = 0.00163 \cdot P / \lambda$$

**Ecuación 2.7.** Calor latente de vaporización

Donde,  $R_s$  es la radiación solar horizontal [ $MJ/m^2 d$ ],  $e_s$  es la presión de vapor de saturación [ $kPa$ ],  $e_a$  es la presión de vapor actual [ $kPa$ ],  $T_a$  es la temperatura media del día [ $^{\circ}C$ ],  $T_d$  la temperatura del punto de rocío [ $^{\circ}C$ ],  $RH$  es la humedad relativa media del día [%],  $u$  la velocidad media del viento [ $m/s$ ],  $P$  es la presión atmosférica [ $kPa$ ] y  $\lambda$  es el calor latente de vaporización cuyo valor es  $2.26 \times 10^{-3}$  [ $MJ/kg$ ].

$RH, R_s, u, P, T_a$  fueron obtenidos de la base de datos del National Solar Radiation Database NSRDB (2020).

### Modelo de Valiantzas

La evaporación se estima a partir de la Ecuación 2.8 (Bontempo Scavo et al., 2019).



$$E = 0.051 \cdot (1 - \tau) \cdot R_s \cdot \sqrt{T_a + 9.5} - 0.188 \cdot (T_a + 13) \cdot \left( \frac{R_s}{R_a} - 0.194 \right) \\ \cdot \left[ 1 - 0.00014 \cdot (0.7 \cdot T_{max} + 0.3 \cdot T_{min} + 46)^2 \cdot \sqrt{\frac{RH}{100}} \right] + 0.049 \\ \cdot (T_{max} + 16.3) \cdot \left( 1 - \frac{RH}{100} \right) \cdot (0.62 + 0.53 \cdot u)$$

### Ecuación 2.8. Método de Valiantzas

Donde,  $E$  es la evaporación diaria [ $mm/d$ ],  $R_a$  la radiación solar extraterrestre [ $MJ/m^2$ ],  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  la temperatura máxima y mínima del día [ $^{\circ}C$ ],  $\tau$  es el coeficiente de reflexión o albedo.

$R_a$ ,  $T_{m\acute{a}x}$ ,  $T_{m\acute{i}n}$  fueron obtenidos de la base de datos del National Solar Radiation Database NSRDB (2020). El valor de  $\tau$  es 0.08 para superficies de agua abierta según Abdelal (2021).

La radiación extraterrestre se obtiene a partir de la Ecuación 2.9.

$$R_a = G_{SC} \cdot \left( 1 + 0.044 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right)$$

### Ecuación 2.9. Radiación Extraterrestre

Donde,  $G_{SC}$  es la constante solar y su valor es  $4.92 MJ/m^2hr$  y  $n$  es el día correspondiente entre el 1 de enero y 31 de diciembre.

### Modelo de Regresión Lineal

Estimar la evaporación mediante el modelo basado en regresión lineal propuesto por Scavo (2019) y se realiza mediante la Ecuación 2.10 (Bontempo Scavo et al., 2019).

$$E = 2.421 + 0.012 \cdot R_s + 0.159 \cdot T_a - 0.056 \cdot RH + 0.122 \cdot u$$

### Ecuación 2.10. Método de Regresión Lineal

Donde,  $E$  es la evaporación diaria [ $mm/d$ ].

### Modelo de Hamon

La Ecuación 2.11 estima la evaporación según Hamon (Knook & Hogeboom, 2016).

$$E = 13.97 \cdot \left( \frac{N}{12} \right)^2 \cdot \left( \frac{SVD}{100} \right)$$

### Ecuación 2.11. Método de Hamon

Donde,  $E$  es la evaporación diaria [ $mm/d$ ],  $SVD$  es la densidad de vapor de saturación,  $N$  es el número máximo de horas luz igual a 6.3 (CONELEC, 2008).

La densidad de vapor de saturación se determina a partir de la Ecuación 2.12 descrita en Knook & Hogeboom (2016).

$$SVD = 2166.74 \cdot \frac{e_a}{T_a}$$

**Ecuación 2.12.** Densidad de Vapor de Saturación

### Modelo de Jensen

Las pérdidas evaporativas se determinan a partir de la Ecuación 2.13 (Knook & Hogeboom, 2016).

$$E = 0.4087 \cdot R_s \cdot [0.014 \cdot (1.8 \cdot T_a + 32) - 0.37]$$

**Ecuación 2.13.** Método de Jensen

Donde,  $E$  es la evaporación diaria [ $mm/d$ ].

### Modelo de Valiantzas-Penman

La estimación de evaporación del modelo de Valiantzas baso en el método de Penman se determina a partir de la Ecuación 2.14 (Abdelal, 2021).

$$E = 0.051 \cdot (1 - \tau) \cdot R_s \cdot \sqrt{T_a + 9.5} - 2.4 \cdot \left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2 + 0.052 \cdot (T_a + 20) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \cdot (a_u - 0.38 + 0.54 \cdot a_u)$$

**Ecuación 2.14.** Método de Valiantzas-Penman

Donde,  $E$  es la evaporación diaria [ $mm/d$ ],  $a_u$  es el coeficiente de Penman igual a 1 cuando se utiliza como base la ecuación de Penman (Abdelal, 2021).

Los métodos para determinar la evaporación cuando están presentes sistemas  $FPV$  fueron tomados de la metodología propuesta por Scavo (2020).

### Modelo para superficies cubiertas con sistemas flotantes

Para estimar la evaporación cuando hay presencia de sistemas fotovoltaicos flotantes la metodología a seguir parte con la Ecuación 2.15 la cual estima la evaporación de la superficie de agua cubierta que está interactuando debajo del panel fotovoltaico.

$$E_{cover} = \left[ \frac{0.408 \cdot \nabla \cdot Q^* + \gamma \cdot \frac{900}{T_a + 273} \cdot u \cdot (e_s - e_a)}{\nabla + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u)} \right]$$

**Ecuación 2.15.** Evaporación de la porción de superficie de agua cubierta

Donde,  $E_{cover}$  es la evaporación diaria de la porción de superficie cubierta [ $mm/d$ ],  $Q^*$  es la radiación neta en la superficie del agua [ $MJ/m^2 d$ ].

Para determinar la radiación neta en la superficie de agua libre se utilizan desde la Ecuación 2.16 hasta la Ecuación 2.18.

$$Q^* = SW + LW$$

**Ecuación 2.16.** Radiación neta en la superficie del agua libre

$$SW = (1 - \alpha) \cdot (R_d + R_b)$$

**Ecuación 2.17.** Radiación de onda corta en la superficie del agua libre

$$LW = \sigma T_a^4 (0.56 - 0.0092 \sqrt{e_a}) (0.10 + 0.90 * 0.3)$$

**Ecuación 2.18.** Radiación de onda larga en la superficie del agua libre

Donde,  $SW$  es la radiación de onda corta [ $MJ/m^2 d$ ],  $LW$  es la radiación de onda larga [ $MJ/m^2 d$ ],  $\alpha$  es la absorptividad,  $R_b$  es la radiación solar horizontal directa [ $MJ/m^2 d$ ],  $R_d$  es la radiación solar horizontal difusa [ $MJ/m^2 d$ ],  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

$R_d, R_b$  fueron obtenidos directamente de la base de datos del National Solar Radiation Database NSRDB (2020).

En cambio, para los sistemas fotovoltaicos flotantes la radiación neta en la superficie de agua cubierta y la evaporación se estiman a continuación:

- **Sistemas Tipo Suspendidos Figura 1.4 B y C**

$$Q_{B,C}^* = SW_{B,C} + LW_{B,C}$$

**Ecuación 2.19.** Radiación neta para sistemas suspendidos

$$SW_{B,C} = (1 - \alpha) R_d$$

**Ecuación 2.20.** Radiación de onda corta para sistemas suspendidos

$$LW_{B,C} = \sigma T_a^4 (0.56 - 0.0092 \sqrt{e_a}) (0.10 + 0.90 * 0.3)$$

**Ecuación 2.21.** Radiación de onda larga para sistemas suspendidos

$$E_{B,C} = (1 - x)E_{free} + xE_{cover}$$

**Ecuación 2.22.** Evaporación total con sistemas tipo suspendidos

Donde,  $E_{B,C}$  es la evaporación total con sistemas tipo flotantes [mm/d],  $E_{free}$  es la evaporación de la superficie descubierta utilizando alguno de los modelos anteriormente detallados,  $x$  corresponde al porcentaje de superficie cubierta.

- **Sistemas Tipo Flotantes Figura 1.4 A y D**

$$Q_{A,D}^* = SW_{A,D} + LW_{A,D}$$

**Ecuación 2.23.** Radiación neta para sistemas flotantes

$$SW_A = 0$$

**Ecuación 2.24.** Radiación de onda corta para Figura 1.4 A

$$SW_D = \alpha(R_d + R_b)(1 - \eta_{el})0.4$$

**Ecuación 2.25.** Radiación de onda corta para Figura 1.3 D

$$LW_{A,D} = \sigma T_a^4(0.56 - 0.0092\sqrt{e_a})0.10$$

**Ecuación 2.26.** Radiación de onda Larga para sistemas flotantes

$$Q^* = Q_{free}^*(1 - x) + Q_{A,D}^*(x)$$

**Ecuación 2.27.** Radiación neta total para sistemas flotantes

$$E_{A,D} = (1 - x) * E_{A,D}'$$

**Ecuación 2.28.** Evaporación total para sistemas tipo flotantes

Donde,  $E_{A,D}$  es la evaporación total con los sistemas tipo flotantes,  $\eta_{el}$  la eficiencia de cobertura,  $E_{A,D}'$  la evaporación total  $E_{cover}$  calculada utilizando el dato  $Q^*$  de la Ecuación 2.27. Radiación neta total para sistemas flotantes

## 2.3 Análisis Paramétrico

Para el análisis paramétrico se selecciona el método para superficies cubiertas con sistemas fotovoltaicos flotantes y se usará un 30% de cobertura. Se realiza una simulación únicamente para un solo día, manteniendo constante todos los parámetros, con excepción de la radiación que variará según el detalle de la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Modificaciones de variables para el análisis paramétrico

Fuente: Propia

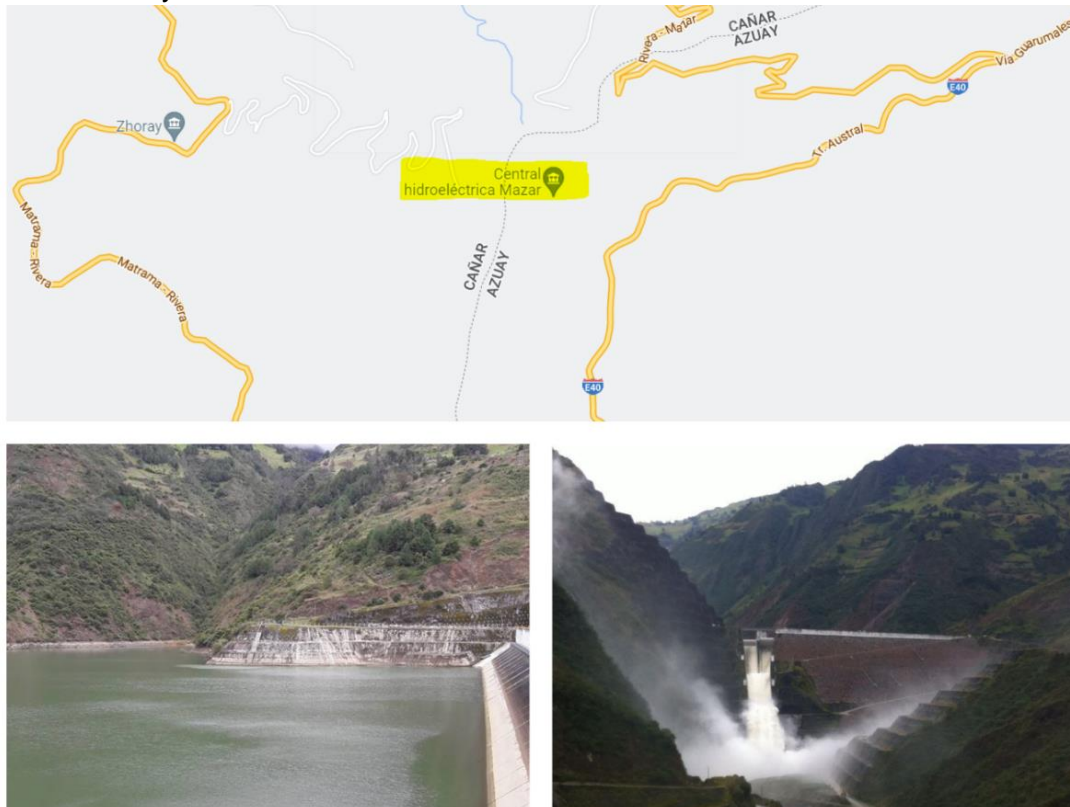
Variable	Valor 1	Valor 2
Radiación Solar [ $W/m^2$ ]	200	1000

## 2.4 Traslado de los modelos matemático a Matlab para superficies libres y parcialmente cubiertas con FPV

Los modelos matemáticos seleccionados serán desarrollados y modelados en Matlab, en el anexo 1 se detalla el código empleado para estimar los resultados.

## 2.5 Área de estudio

El modelo matemático ha sido planteado de manera general sin un caso de estudio en particular. Sin embargo, una vez establecido es necesario aplicarlo a un lugar de estudio específico de tal forma que podamos comparar los datos de evaporación obtenidos con algo ya estudiado y analizado.



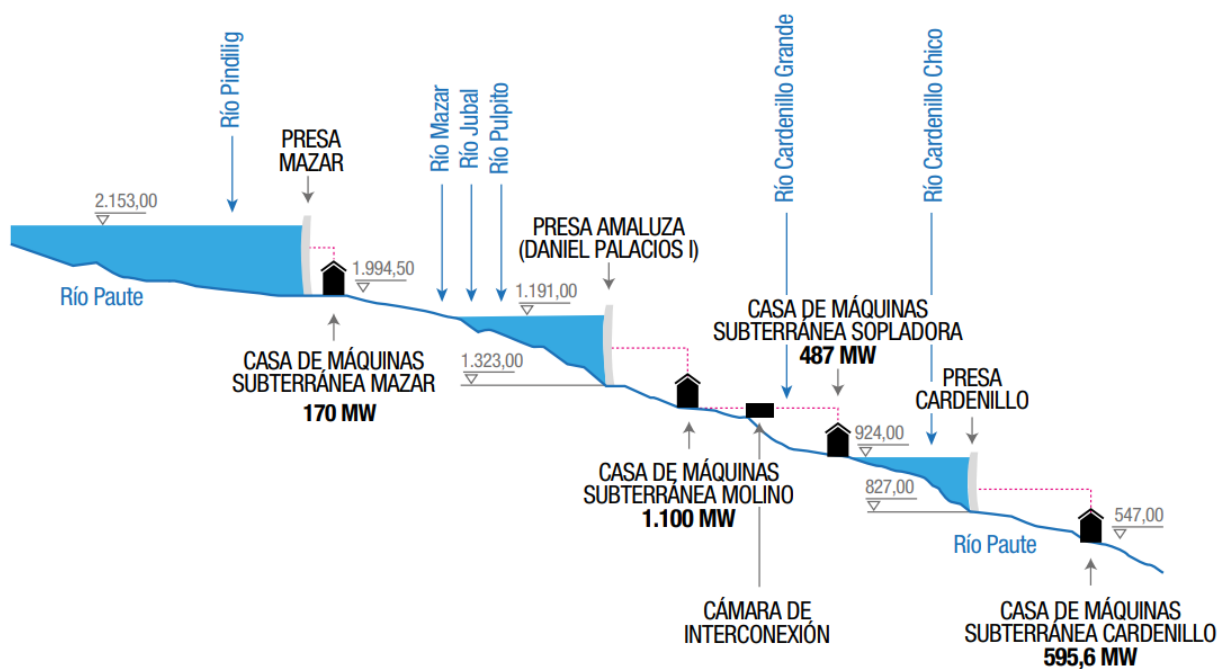
**Figura 2.1.** Ubicación de la central de Mazar

Fuente: Google Maps

El lugar escogido es la represa hidroeléctrica de Mazar ubicada en la provincia de Cañar, cantón Azogues, esta ubicación se puede observar en la Figura 2.1.

Tiene una potencia nominal y efectiva de 170 MW, cuenta con una pantalla de hormigón la cual tiene una altura de 166 m y una longitud de 340 m. Es una central de tipo embalse, su capacidad es de 410 millones m<sup>3</sup> de agua y su casa de máquinas es subterránea la cual contiene dos turbinas de generación tipo Francis de 85 MW. Lleva un periodo de 10 años de funcionamiento, esta central hidroeléctrica aporta a la demanda energética del (SIN) Sistema Nacional Interconectado con un 3% y tiene unos índices del 95.81% de confiabilidad y 93.75% de disponibilidad (CELEC, 2020).

Una de las principales ventajas de esta central es una mejora en el aprovechamiento y regulación en el caudal de la cuenca del Río Paute, este aprovechamiento aumenta la energía de otras centrales que se encuentran río abajo, así como se puede observar en la (Ministerio de Energía y Recursos Renovables, 2017).



**Figura 2.2.** Aprovechamiento hidroeléctrico de la cuenca del río Paute

**Fuente:** Ministerio de Energía y Recursos Renovables (2017)

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

##### Evaporación en la superficie libre

La Figura 3.1 muestra una comparación gráfica de la estimación de la evaporación acumulada mensual entre los modelos matemáticos de literatura que fueron utilizados para determinar la evaporación de la superficie libre de la represa de Mazar a lo largo del año 2020.

Para los modelos de Valiantzas, Jensen, Valiantzas-Penman la mayor evaporación mensual es en agosto y corresponde a 175.63 [mm], 118.34 [mm], 170.93 [mm] respectivamente, mientras que la menor se da en julio los valores son 134.3 [mm], 74.78 [mm], 127.16 [mm]. En el modelo de Penman, Hamon y Regresión Lineal el valor más alto corresponde a 186.82 [mm], 296.99 [mm], 60.52 [mm] en el mes de octubre y el menor a febrero con 120.47 [mm], 268.16 [mm], 45.16 [mm] de evaporación. Adicional se observa que los métodos de Hamon, Jensen y Regresión Lineal tienen una variación considerable con respecto a los demás modelos lo que también se observa en la Figura 5.1 del Anexo II la cual muestra la evaporación diaria en cada uno de los días del año.

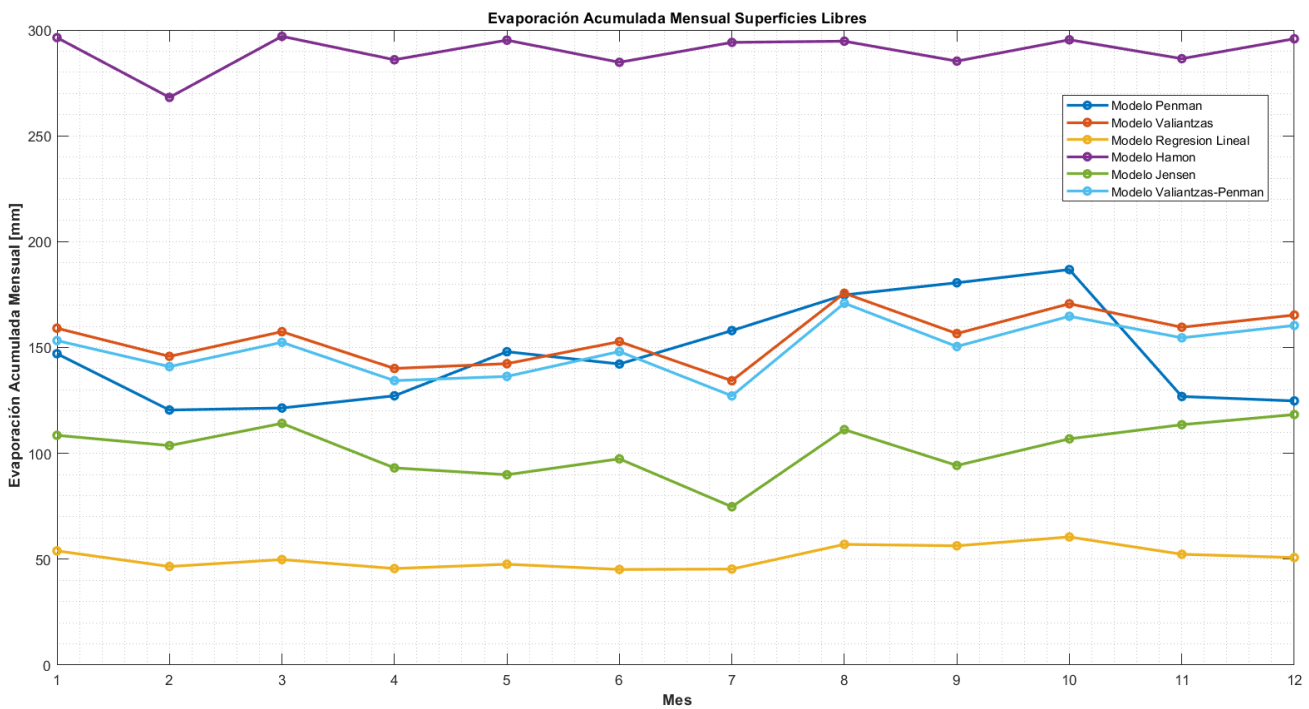


Figura 3.1. Evaporación acumulada mensual superficies libres

Fuente: Propia

## Evaporación en superficies parcialmente cubiertas con sistemas tipo flotantes

La Figura 3.2 muestra la reducción en la evaporación mensual del reservorio cuando un 30%, 50% y 75% de su superficie se encuentra cubierta con sistemas tipo flotantes, de manera general se puede observar que tanto las gráficas para la Figura 1.4 A y D, los valores de evaporación acumulada para los porcentajes de cobertura antes mencionados, son prácticamente iguales para todos los meses del año y para todos los días mostrados en la Figura 5.2 del Anexo II.

Al 75%, 50% y 30% la menor estimación de evaporación es 13.63 [mm], 27.29 [mm], 38.25 [mm] respectivamente y se presenta en el mes de febrero a partir del cual se tiene una curva ascendente hasta llegar al valor más alto 21.45 [mm], 42.94 [mm], 60.15 [mm] que corresponde a octubre, luego decae hasta noviembre y se mantiene prácticamente constante hasta diciembre.

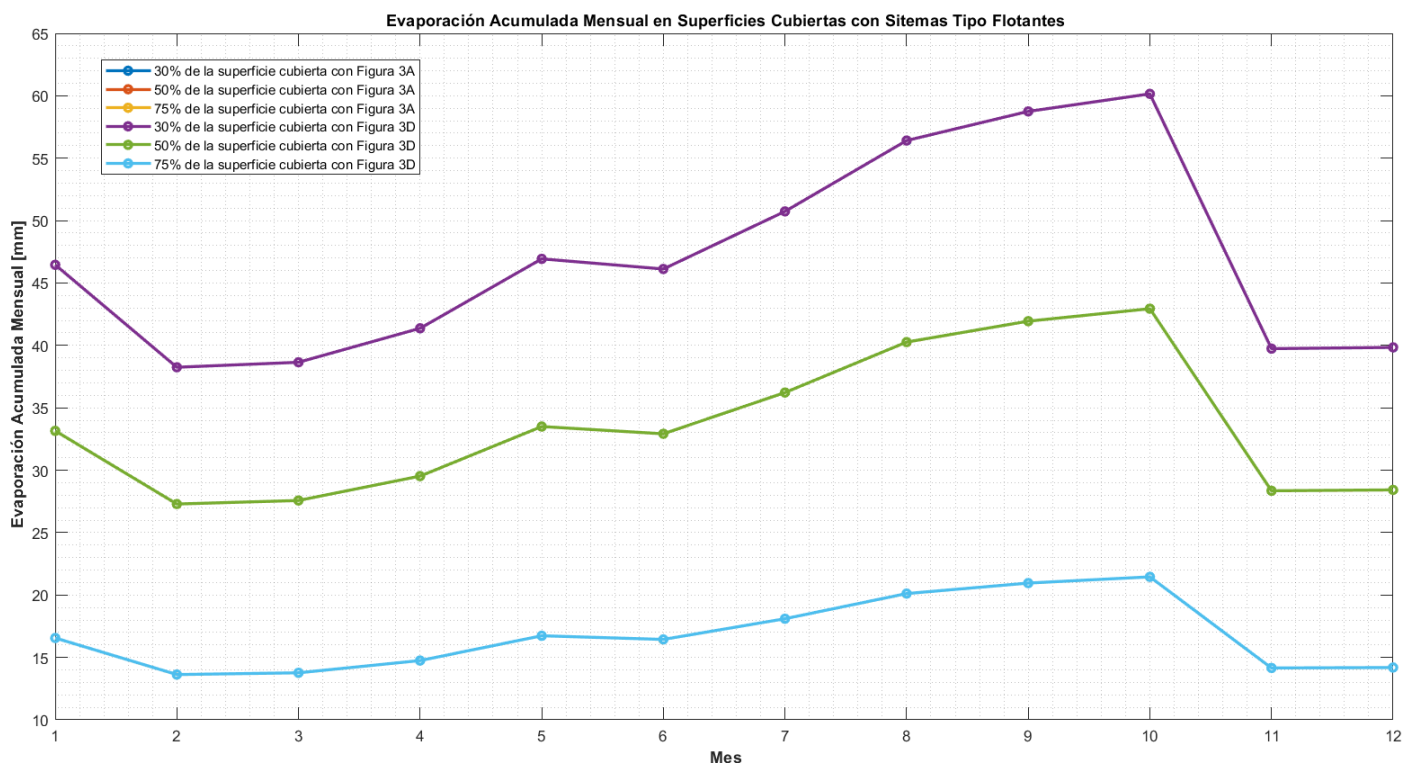


Figura 3.2. Evaporación acumulada mensual en superficies cubiertas al 30%, 50% y 75% con sistemas tipo flotantes

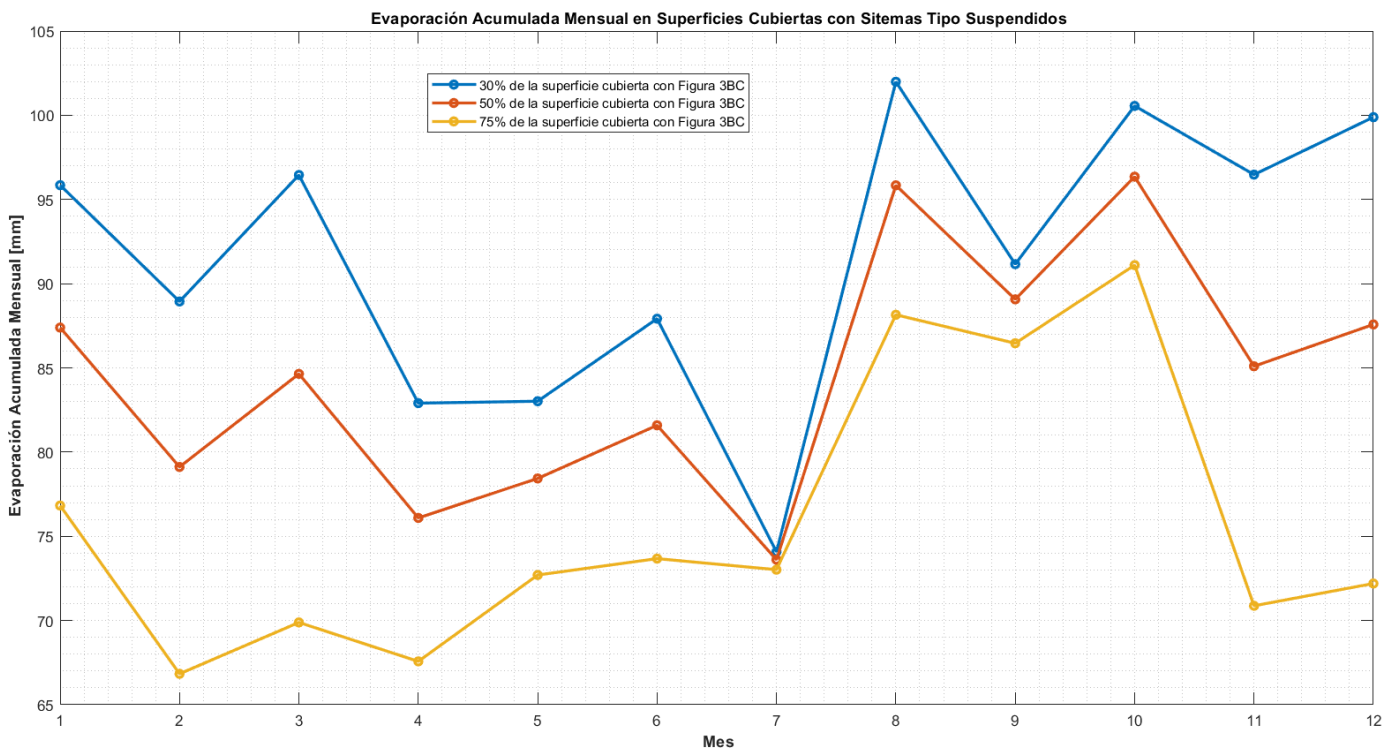
Fuente: Propia



## Evaporación en superficies parcialmente cubiertas con sistemas tipo suspendidos

La Figura 3.3 muestra una comparativa mensual cuando el reservorio se encuentra cubierto el 75%, 50% y 30% de su superficie con sistemas fotovoltaicos flotantes tipo suspendidos, esta gráfica presenta variaciones en cada mes, es decir, no hay una tendencia lo valores aumentan y disminuyen la gráfica correspondiente para todos los días del año se encuentra en la Figura 5.3 del Anexo II.

Para el 30% de cobertura la evaporación mensual más alta es 101.99 [mm] y se da en agosto mientras que la menor en julio y es 74.08 [mm], al 50% de cobertura el valor más alto es en octubre con 96.35 [mm] y el mínimo en julio 76.31 [mm], finalmente para el 75% de cobertura la estimación más alta es 91.1 [mm] y es en octubre, la menor en febrero 66.83 [mm].



**Figura 3.3.** Evaporación en superficies parcialmente cubiertas con sistemas tipo suspendidos

**Fuente:** Propia

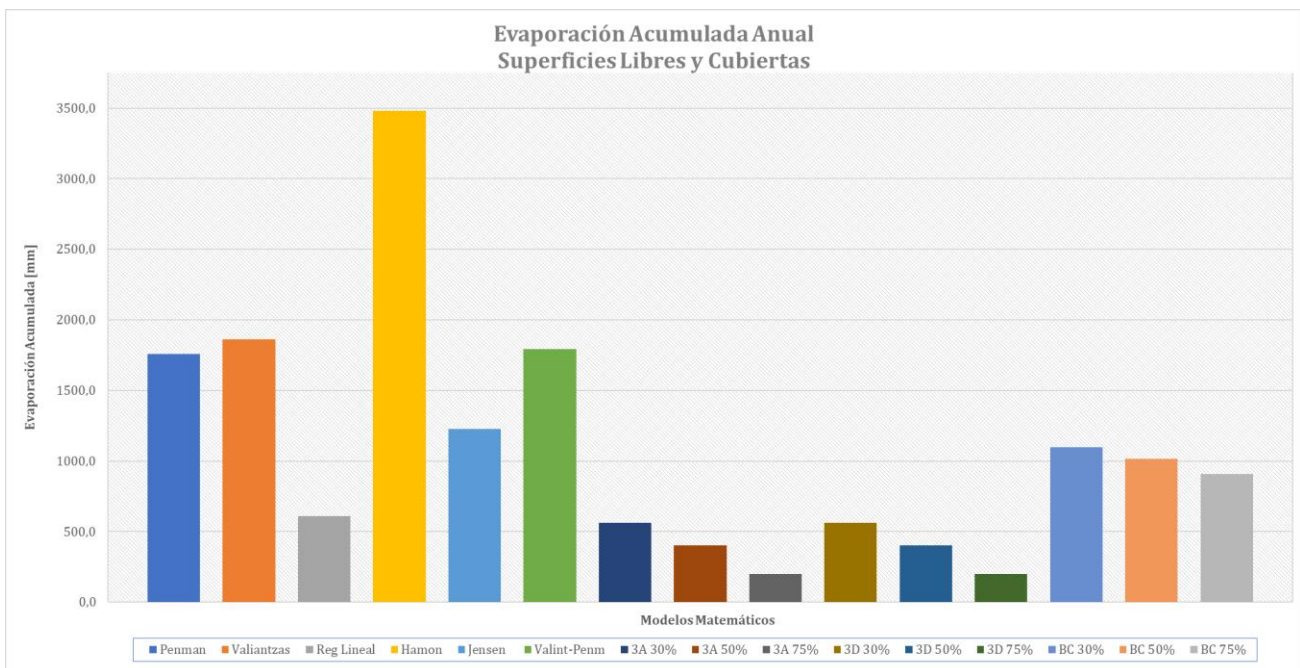
## Evaporación anual

La Figura 3.4 muestra la evaporación acumulada anual de cada uno de los métodos utilizados tanto para superficies libres como para superficies cubiertas.

Considerando solo los modelos para superficie libre y partiendo del modelo de Penman como referencia, hay una variación del 5.77% con el método de Valiantzas, 65.25% con el método de Regresión Lineal, 97.87% con el modelo de Hamon, 30.28% con el método de Jensen y 2.02% con el modelo de Valiantzas-Penman.

Si tomamos como base el modelo de Penman podemos decir que cuando están instalados sistemas fotovoltaicos del tipo flotantes la reducción de la evaporación es 67.96% cuando hay un 30% de la superficie cubierta, 77.13% al 50% de cobertura, 88.58% al 75% de cobertura. Para los sistemas fotovoltaicos del tipo suspendidos la evaporación se reduce un 37.48% con un 30% de la superficie cubierta, 42.28% al 50% de cobertura, 48.29% al 75% de cobertura.

En cambio, analizando solamente las dos clasificaciones de los sistemas fotovoltaicos flotantes se tiene que para un porcentaje del 30%, 50% y 75% de cobertura de la superficie, si se utiliza los sistemas del tipo flotantes en vez de los suspendidos hay una disminución de la evaporación del 48.75%, 60.38% y 77.91% respectivamente.

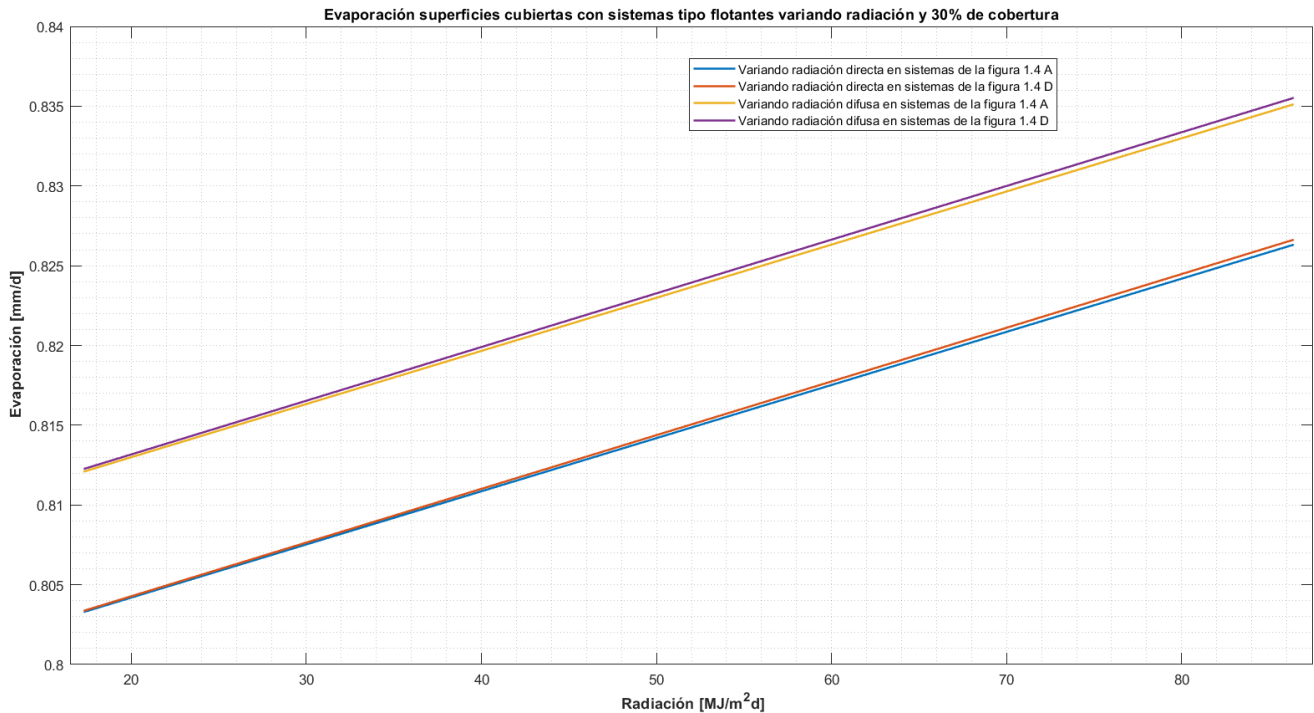


**Figura 3.4.** Evaporación Acumulada Anual

Fuente: Propia

### Análisis paramétrico: Evaporación en superficies cubiertas un 30% variando radiación solar directa y difusa en sistemas del tipo flotantes.

La Figura 3.5 muestra la evaporación en superficies parcialmente cubiertas para la clasificación sistemas del tipo flotantes variando la radiación difusa y directa, cada una en un rango entre  $17.8 - 86.4 [MJ/m^2 d]$ . Las gráficas tienen una tendencia lineal creciente a razón de  $0.0033 mm/10 MJ/m^2 d$ , los mayores valores corresponden cuando se varia la radiación difusa mientras que los más bajos corresponden a la variación de la radiación solar directa. Sin embargo, la variación es casi mínima ya que la diferencia de evaporación que existe entre los valores mínimos y máximos de las rectas correspondientes a la variación de la ración directa y la radiación difusa es de  $0.023 mm$ . Además, en ambos casos las rectas para los sistemas de la Figura 1.4 A son ligeramente menores a los sistemas de la Figura 1.4 D.



**Figura 3.5.** Evaporación en superficies cubiertas con sistemas tipo flotantes variando radiación y 30% de cobertura.

**Fuente:** Propia

## **3.2 Discusión**

### **Evaporación en la superficie libre**

La diferencia entre los modelos de evaporación de superficies libres puede deberse a que, la mayoría de los métodos no consideran el almacenamiento de calor en los reservorios, o que algunos no usan todas las variables climatológicas. Esto puede resultar en una desviación considerable en la estimación de las pérdidas por evaporación entre modelos.

### **Evaporación en superficies parcialmente cubiertas con sistemas tipo suspendidos**

En el mes de Julio, en la Figura 3.3 podemos notar que el valor de evaporación mensual no tiene mucha variación para los tres porcentajes de cobertura. Esto puede deberse a que en este mes se da el más bajo promedio de temperatura y radiación solar global, lo que ocasiona que la evaporación de la superficie libre y la cubierta tengan valores cercanos. Si se observa la Ecuación 2.22 al ser los valores cercanos, al sumar los tres porcentajes y sus complementos resulta en valores de evaporación total similares.

### **Evaporación en superficies parcialmente cubiertas con sistemas tipo flotantes**

Al observar la Figura 3.2, no se observan diferencias entre la clasificación A y D de los sistemas del tipo flotantes Figura 1.4, a pesar de que la clasificación D considera la radiación solar directa y difusa, mientras que la clasificación A no. Sin embargo, al multiplicar estos valores por las demás variables de la Ecuación 2.15 al final no marca una diferencia considerable para el resultado final y por lo tanto las evaporaciones son prácticamente las mismas.

### **Comparación**

El rango de valores obtenidos para cada uno de los diferentes modelos utilizados para estimar la evaporación en el reservorio de la represa de Mazar lo largo del año son similares a resultados de estudios realizados en diferentes cuerpos de agua por diversos autores.

Según Bontempo Scavo (2019) los resultados para la estimación de la evaporación diaria de la superficie libre del lago Lentini, las curvas fluctúan en un rango entre 1 y 10 [mm/d], mientras que mis resultados para evaporación de la superficie libre considerando todos los modelos en general, están entre 1 y 10[mm/d].

En cambio, cuando están presentes sistemas fotovoltaicos considera un 10%, 30%, 50%, 70% y 100% de la superficie cubierta y los valores son anuales. En los sistemas del tipo suspendidos los resultados son 1638 [ $mm\ y^{-1}$ ], 1429 [ $mm\ y^{-1}$ ], 1221 [ $mm\ y^{-1}$ ], 1013 [ $mm\ y^{-1}$ ] y 701 [ $mm\ y^{-1}$ ] respectivamente. Para los sistemas tipo flotantes los valores son 1423 [ $mm\ y^{-1}$ ], 883 [ $mm\ y^{-1}$ ], 481 [ $mm\ y^{-1}$ ], 186 [ $mm\ y^{-1}$ ] y 0 [ $mm\ y^{-1}$ ] para los porcentajes de cobertura antes mencionados.

Sin embargo, mis resultados para 30%, 50% y 75% son una estimación anual de 1099.22 [ $mm\ y^{-1}$ ], 1014.81 [ $mm\ y^{-1}$ ] y 909.29 [ $mm\ y^{-1}$ ] para sistemas tipo suspendidos y 563.4 [ $mm\ y^{-1}$ ], 402.09 [ $mm\ y^{-1}$ ] y 200.83 [ $mm\ y^{-1}$ ] para sistemas tipo flotantes. Comparando resultados para los 3 porcentajes de superficie cubierta que utilicé se tiene una variación del 36.19%, 14.63% y 7.98% con los sistemas del tipo flotantes y 30%, 40.81%, 57.16% con los sistemas tipo suspendidos de Bontempo Scavo (2019).

Estas variaciones pueden deberse al origen de los datos ya que son localidades distintas con diferentes condiciones ambientales. No obstante, la diferencia entre los sistemas tipo suspendidos es muy alta, cuyo origen podría ser que en estos sistemas también hay que sumar la evaporación debido al porcentaje de la superficie descubierta, lo que añadiría otra modificación al resultado.

López Moreno (2013) analizó las pérdidas evaporativas mensuales en los embalses de los Pirineos a través del modelo de Penman para láminas de agua. Para los 3 embalses las curvas son análogas con un aumento en la evaporación desde el mes de marzo hasta octubre, y de ahí un descenso hasta diciembre, estas pérdidas por evaporación por unidad de superficie están en un rango de 10 a 200 [ $mm/m$ ]. Si comparamos con la curva del modelo de Penman para Mazar tiene una similitud casi en su totalidad, la diferencia radica en el rango de valores, ya que para Mazar está entre 100 a 200 [ $mm/m$ ]. Esta diferencia puede deberse a que en el Ecuador no hay cuatro estaciones, y por lo tanto el extremo inferior se referiría al invierno en el hemisferio norte.

La tesis de maestría de Knook & Hogeboom (2016) determina la evaporación mensual de los reservorios de Guri, lago Mead y Nasser con los métodos de Jensen, Hamon y Penman. Las gráficas respectivas varían dependiendo del cuerpo de agua y del modelo matemático utilizado para realizar los cálculos. Para el reservorio de Guri el rango está entre 75 a 250 [ $mm/m$ ] y la tendencia varía de mes a mes, en el lago Mead entre 0 a 200 [ $mm/m$ ] y se tiene una curva ascendente desde febrero a julio, a partir de ahí una disminución hasta diciembre y finalmente el lago Nasser entre 40 a 450 [ $mm/m$ ] y las curvas aumentan desde enero hasta mitad de año y descienden hasta llegar a diciembre. En las 3 gráficas el modelo

de Penman es el mayor, luego Jensen y Hamon, no obstante, en la superficie libre de Mazar el modelo de Penman y Jensen son relativamente parecidos y un rango similar a los Mead, Nasser, Guri y el método de Hamon es mayor. Esta disparidad de Hamon puede ser porque tiene como variable de entrada las horas de luz, y nuestro país al estar en el Ecuador, entonces el resultado de evaporación es mayor debido a que durante todo el año las horas de luz son constantes.

### **Implicaciones**

Si bien cubrir el 100% de la superficie podría llegar a ahorrar grandes cantidades de agua, no es una solución factible ni muy práctica debido a que sería muy costoso y dependiendo de la configuración del reservorio se podría cubrir solamente las partes menos profundas. Por lo tanto, este estudio demostró que, para la definición del área de cobertura de sistemas fotovoltaicos flotantes en reservorios hidroeléctricos, es necesario determinar el tipo de instalación, y por lo tanto se debería hacer un balance entre la evaporación evitada, y los posibles costos y requisitos estructurales de la instalación. Al final, la instalación adecuada de sistemas flotantes puede establecer un precedente en el país acerca de una solución para mejorar el rendimiento de los reservorios hidroeléctricos.

### **Conclusiones**

De los resultados obtenidos para estimar la evaporación de la superficie libre se puede deducir que, de los modelos presentes en la literatura, los de mejor desempeño y que no presentan una variación considerable en los cálculos son el método de Penman, Valiantzas y Jensen.

Los resultados indicaron que anualmente se pierde un promedio 1700 [mm/y] de agua del reservorio de la represa de Mazar, en cambio para superficies cubierta con sistema tipo flotantes se reduce las pérdidas a 563,40 [mm/y] al 30%, 402,09 [mm/y] al 50% y 200,83 [mm/y] al 75%, en cambio con sistemas tipo suspendidos se tiene 1099,22 [mm/y] al 30%, 1014,81 [mm/y] al 50% y 909,29 [mm/y] al 75%. Este proyecto sugiere utilizar los sistemas del tipo flotantes Figura 1.4 A y D ya que funcionan de mejor manera a la hora de reducir la evaporación comparados con la clasificación suspendida de la Figura 1.4 B y C. Al instalar este tipo de sistemas en un 30% de la superficie total del reservorio de agua se logra una disminución en la tasa de evaporación de alrededor 68% anual.

La cantidad de agua evaporada cuando están instalados sistemas fotovoltaicos flotantes no solo depende de los factores climáticos, también depende del tipo de instalación que

podría usarse. Los sistemas que usan instalaciones del tipo flotante logran una mayor disminución de la evaporación a comparación de los tipos suspendidos. Esto debido a que el panel fotovoltaico flotante genera una sombra que cubre una mayor superficie bajo el panel, y por lo tanto, bloquea más radiación solar incidente en el cuerpo de agua.

Los modelos matemáticos utilizados para realizar las estimaciones para la superficie libre, así como también cuando están presentes sistemas fotovoltaicos flotantes, pueden emplearse para calcular las pérdidas de agua por evaporación en cualquier tipo de reservorios hidroeléctricos únicamente ingresando los datos meteorológicos requeridos del lugar.

Las personas que vayan a utilizar sistemas fotovoltaicos flotantes para instalarlos en cuerpos de agua, como los reservorios hidroeléctricos, deberían utilizar la clasificación del tipo flotante y cubrir solamente un 30% del reservorio.

## **Recomendaciones**

Para realizar estimaciones de evaporación de la superficie libre de agua en el Ecuador, no se recomienda utilizar los modelos de Regresión Lineal y Hamon puesto que los resultados estarán subdimensionados y sobredimensionados respectivamente.

Se recomienda tener la posibilidad de validar estos resultados con la ayuda de datos en sitio. Para esto, se podría usar un evaporímetro de forma paralela con el fin de poder comparar los resultados finales y así evaluar la solidez de los modelos matemáticos.

Se recomienda seguir con este estudio, haciendo un análisis económico-financiero de los sistemas estudiados en este trabajo. De esta manera, se podría brindar un costo aproximado de la instalación de este tipo de sistemas, y hacer una comparación de costo-beneficio.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelal, Q. (2021). Floating PV; An assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3), 732–739. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab001>
- Assouline, S., Narkis, K., & Or, D. (2011). Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers. *Water Resources Research*, 47(7), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2010WR009889>
- Aulestia L, & Celi M. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD DE 20 kW/mes PARA SER UTILIZADOS EN INSTALACIONES INDUSTRIALES.*
- Bontempo Scavo, F., Tina, G. M., Gagliano, A., & Nižetić, S. (2019). An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 167–188. <https://doi.org/10.1002/er.5170>
- CELEC. (2020). *La Central Hidroeléctrica Mazar cumple 10 años de operación, en beneficio de los ecuatorianos 31-DIC-2020.* <https://www.celec.gob.ec/electroguayas/index.php/sala-de-prensa/noticias/408-la-central-hidroelectrica-mazar-cumple-10-anos-de-operacion-en-beneficio-de-los-ecuatorianos-31-dic-2020>
- CONELEC. (2008). ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA. *Conelec*, 1–51. [http://www.conelec.gob.ec/archivos\\_articulo/Atlas.pdf](http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf)
- CONELEC. (2022). *Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental.*
- Energy, L. N. R. (2020). *National Solar Radiation Database.* <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/>
- FAO, F. and A. O. (n.d.). *Geo-referenced Database on Dams.* <https://www.fao.org/aquastat/en/databases/dams>
- Hernandez, J., & Santana Pérez, L. M. (2008). Evapotranspiracion Penman-Monteith. *Agro Cabildo*, 1–77.
- Juncosa, R. (2007). Capítulo 4: Evaporación y transpiración. Evapotranspiración. In *Hidrología 1: Ciclo hidrológico.*



- Knook, L., & Hogeboom, I. H. J. (2016). *THE WATER FOOTPRINT RELATED TO RESERVOIR OPERATION ON A GLOBAL SCALE DEPARTMENT OF WATER ENGINEERING AND MANAGEMENT EXAMINATION COMMITTEE*.
- López Moreno, J. I. (2013). Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Pirineo. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34, 61–81.  
<https://doi.org/10.18172/cig.1207>
- Mariana Achad. (2019). *Estimación de la evaporación y la evapotranspiración potencial en la ciudad de Río Ceballos*.
- Ministerio de Energía y Recursos Renovables. (2017). *Expansión de la generación*. 61.  
<https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/4.-EXPANSION-DE-LA-GENERACION.pdf>
- Nathalie Alcántara. (2018). *Estudio técnico-económico de una central fotovoltaica flotante en el embalse de Tavera*.
- Sandia National Laboratories. (n.d.). *Extraterrestrial Radiation*.  
[https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/irradiance-and-insolation-2/extraterrestrial-radiation/#:~:text=Extraterrestrial radiation \( \) is the intensity,plane normal to the sun.](https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/irradiance-and-insolation-2/extraterrestrial-radiation/#:~:text=Extraterrestrial radiation ( ) is the intensity,plane normal to the sun.)
- Scavo, F. B., Tina, G. M., & Gagliano, A. (2019). *Comparison of evaporation models for free water basins surfaces*.
- Scavo, F. B., Tina, G. M., Gagliano, A., Merlo, L., & Bizzarri, F. (2020, October 29). Assessment of the evaporation rate in reservoir partially covered by floating photovoltaic plants. *11th International Renewable Energy Congress, IREC 2020*.  
<https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310401>
- SCINERGY. (2019). *Mapa Solar del Ecuador 2019*. [https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa\\_Solar\\_del\\_Ecuador\\_2019.pdf](https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf)
- SocialEnergy. (2021). *¿Cómo funciona una instalación solar fotovoltaica?*  
<https://www.socialenergy.es/blog/instalaciones-fotovoltaicas/como-funciona-instalacion-solar-fotovoltaica/>
- Waheeb Youssef, Y., & Khodzinskaya, A. (2019). A Review of Evaporation Reduction Methods from Water Surfaces. *E3S Web of Conferences*, 97.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705044>

Zhingre, J. (2022). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UNA ESTACIÓN DE MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN DE EVAPORACIÓN ATMOSFÉRICA DE AGUA (CLASE PAN A) PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOMBRAS DEBIDO A PANELES FOTOVOLTAICOS EN RESERVORIOS HIDROELÉCTRICOS*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

## **5 ANEXOS**

ANEXO I. Código Matlab para estimar la evaporación y análisis paramétrico

ANEXO II. Evaporación diaria

# ANEXO I

## Estimación de la evaporación

```
clc
clear

Days=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','A2:A366'); %Days
Rs=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','J2:J366'); %Radiación solar
horizontal [MJ/m^2 d]
Rd=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','H2:H366'); %Radiación solar
difusa [MJ/m^2 d]
Rb=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','I2:I366'); %Radiacion solar
directa [MJ/m^2 d]
Ta=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','B2:B366'); %Temperatura
media del día [°C]
Td=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','D2:D366'); %Temperatura del
punto de rocío [°C]
u=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','C2:C366'); %Velocidad del
viento
Ra=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','N2:N366'); %Radiacion
extraterrestre [MJ/m^2 d]
Tmax=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','V2:V366'); %Temperatura
máxima del día [°C]
Tmin=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','W2:W366'); %Temperatura
mínima del día [°C]
RH=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','L2:L366'); %Humedad
relativa
ea=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','Q2:Q366'); %Presión de
vapor de saturación [kPa]
es=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','O2:O366'); %Presión de
vapor a la temperatura del aire [kPa]
CtePs=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','U2:U366'); %Constante
Psicromretrica [kPa/°C]
Pend=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','T2:T366'); %Pendiente de
la curva de saturación [kPa/°C]
Tao=0.08; %0.08; %Coeficiente de reflexión o albedo
Alfa=0.13; % Absortividad del vidrio
n=0.6; %Eficiencia de cobertura
SVD=xlsread('DATOS_MAZAR.xlsx','DATOS','X2:X366');

%MODELO DE PENMAN
Rn=0.00714.*Rs+(5.26e-6).*Rs.*((Ta+17.8).^ (1.87))+ (3.94e-
6).*((Rs).^ (2))-((2.39e-9).* (Rs).^ (2)).* ((Ta-7.2).^ (2)))-1.02;
%Radiación neta efectiva [mm/d]
Esa=33.86.*((0.00738.*Ta+0.8072).^8)-(0.00738.*Td+0.8072).^8);
%es-ea
%Ea=(Esa.^0.88).* (0.42+0.0029.*u*86.4); %Evaporación de una
bandeja de Clase A [mm/d]
Ea=((es-ea)*10).^0.88).* (0.42+0.0029.*u*86.4); %Evaporación de
una bandeja de Clase A [mm/d]
```

```

E=(Pend./(Pend+CtePs)).*Rn+(CtePs./(CtePs+Pend)).*Ea;

%MODELO DE VALIANTZAS
O1=0.051.*(1-Tao).*Rs.*sqrt(Ta+9.5);
O2=0.188.*(Ta+13).*((Rs./Ra)-0.194);
O3=1-0.00014*((0.7.*Tmax+0.3.*Tmin+46).^2).*sqrt(RH./100);
O4=0.049.*(Tmax+16.3).*(1-(RH./100)).*(0.62+0.53.*u);

E2=O1-O2.*O3+O4; %Evaporación Valiantzas

%MODELO DE REGRESION LINEAL
E3=2.421+0.012.*Rs+0.159.*Ta-0.056.*RH+0.122.*u; %Evaporación
Regresión Lineal

%MODELO DE HAMON
E4=13.97*((6.3/12)^2).*(SVD/100);

%MODELO JENSEN
E5=0.408.*Rs.*(0.014.*(1.8.*Ta+32)-0.37); %Evaporación Jensen

%MODELO DE VALIANTZAS 2 BASADO EN PENMAN
O5=0.051.*(1-Tao).*Rs.*sqrt(Ta+9.5);
O6=2.4.*((Rs./Ra).^2);
O7=0.052.*(Ta+20).*(1-(RH./100)).*(1-0.38+0.54.*u);

E6=O5-O6+O7 %Evaporación Valiantzas 2

plot(Days,E,Days,E2,Days,E3,Days,E4,Days,E5,Days,E6,'LineWidth',1)
xlabel('Días')
ylabel('Evaporación [mm/d]')
title('Evaporación Superficies Libres')
legend('Modelo Penman','Modelo Valiantzas','Modelo Regresion
Lineal','Modelo Hamon','Modelo Jensen','Modelo Valiantzas 2')
xlim([1 365])

% ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
FLOTANTES

x1=0.3; %Porcentaje de superficie de agua cubierta
x2=0.5;
x3=0.75;

%SISTEMAS SUSPENDIDOS FIGURA 3B,C

SWs=(1-Alfa).*Rd;
LWs=(5.67e-8).*(Ta.^4).*(0.56-0.0092.*sqrt(ea)).*(0.1+0.9*x3);
QBC=SWs+LWs; %Balance de energía en la superficie de agua cuando
está presente sistemas suspendidos

O8=0.408.*Pend;
O9=CtePs.*(900./(Ta+273)).*u.*(es-ea);
O10=Pend+CtePs.*(1+0.34.*u);

```

```
EBC=(08.*QBC+09)./010; %Evaporación debajo del módulo fotovoltaico
Efree=0.408.*Rs.*(0.014.*(1.8.*Ta+32)-0.37); %Evaporacion de la
superfice libre (Modelo Jensen)
```

```
EBCT1=(1-x1)*Efree+x1*EBC; %Evaporación con sistemas suspendidos
30% de cobertura
```

```
EBCT2=(1-x2)*Efree+x2*EBC; %Evaporación con sistemas suspendidos
50% de cobertura
```

```
EBCT3=(1-x3)*Efree+x3*EBC; %Evaporación con sistemas suspendidos
75% de cobertura
```

```
%Tabla2=table(SWs,LWs,QBC,08,09,010,EBC,Efree);
%writetable(Tabla2,'FIGURA BC.xlsx')
```

```
%plot(Days,EBCT1,Days,EBCT2,Days,EBCT3,'LineWidth',1)
%xlabel('Días')
%ylabel('Evaporación [mm/d]')
%title('Evaporación Superficies Cubiertas con Sistemas Tipo
Suspendidos')
%legend('30% de la superficie cubierta con Figura 3BC','50% de la
superficie cubierta con Figura 3BC','75% de la superficie cubierta
con Figura 3BC')
%xlim([1 365])
```

```
%SISTEMAS FLOTANTES FIGURA 3A,D
```

```
SWfA=0;
LWfAD=(5.67*10^-8).*(Ta.^4).*(0.56-0.0092.*sqrt(ea)).*0.1;
SWfD=Alfa*(Rd+Rb).*(1-n)*0.4;
Qfree=(1-Alfa)*(Rd+Rb)+(5.67e-8).*(Ta.^4).*(0.56-
0.0092.*sqrt(ea)).*0.1;
QcoverA=SWfA+LWfAD;
QcoverD=SWfD+LWfAD;
QA1=Qfree*(1-x1)+QcoverA*x1; % Balance de energía en la superficie
de agua cuando está presente sistemas flotantes A
QD1=Qfree*(1-x1)+QcoverD*x1;% Balance de energía en la superficie
de agua cuando está presente sistemas flotantes D
QA2=Qfree*(1-x2)+QcoverA*x2; % Balance de energía en la superficie
de agua cuando está presente sistemas flotantes A
QD2=Qfree*(1-x2)+QcoverD*x2;% Balance de energía en la superficie
de agua cuando está presente sistemas flotantes D
QA3=Qfree*(1-x3)+QcoverA*x3; % Balance de energía en la superficie
de agua cuando está presente sistemas flotantes A
QD3=Qfree*(1-x3)+QcoverD*x3;% Balance de energía en la superficie
de agua cuando está presente sistemas flotantes D

EA1=(1-x1)*(08.*(QA1-0)+09)./010; % Evaporacion con FPV figura 3A
ED1=(1-x1)*(08.*(QD1-0)+09)./010; % Evaporacion con FPV figura 3D
EA2=(1-x2)*(08.*(QA2-0)+09)./010; % Evaporacion con FPV figura 3A
ED2=(1-x2)*(08.*(QD2-0)+09)./010; % Evaporacion con FPV figura 3D
EA3=(1-x3)*(08.*(QA3-0)+09)./010; % Evaporacion con FPV figura 3A
ED3=(1-x3)*(08.*(QD3-0)+09)./010; % Evaporacion con FPV figura 3D
```

```

%plot(Days,EA1,Days,EA2,Days,EA3,Days,ED1,Days,ED2,Days,ED3,'LineW
idth',1)
xlabel('Días')
ylabel('Evaporación [mm/d]')
title('Evaporación Superficies Cubiertas con Sistemas Tipo
Flotantes')
legend('30% de la superficie cubierta con Figura 3A','50% de la
superficie cubierta con Figura 3A','75% de la superficie cubierta
con Figura 3A','30% de la superficie cubierta con Figura 3D','50%
de la superficie cubierta con Figura 3D','75% de la superficie
cubierta con Figura 3D')
xlim([1 365])

```

## Análisis paramétrico

```

clear
clc

% ANÁLISIS PARAMÉTRICO
Day=1; Rs1=27.8; Rd1=4.83; Rb1=31.24; Ta=19.23;
Td=14; u=0.78; Ra=121.07; Tmax=24; Tmin=16;
RH=73; ea=1.63; es=2.23; CtePs=57.65; Pend=0.14;
SVD=251.24; Tao=0.08; Alfa=0.13; n=0.6;

Rd2=linspace(17.28,86.4);
Rb2=linspace(17.28,86.4);Rs2=linspace(17.28,86.4);
Rd=transpose(Rd2); Rb=transpose(Rb2); Rs=transpose(Rs2);
Ta1=10; Ta2=40;
u1=1; u2=20;
x=0.3;

%SISTEMAS SUSPENDIDOS FIGURA 3B,C

% VARIANDO RD
SWs_Rd=(1-Alfa).*Rd;
LWs=(5.67e-8).*(Ta.^4).*(0.56-0.0092.*sqrt(ea)).*(0.1+0.9*0.3);
QBC_Rd=SWs_Rd+LWs;

O8=0.408.*Pend;
O9=CtePs.*(900./(Ta+273)).*u.*(es-ea);
O10=Pend+CtePs.*(1+0.34.*u);
EBC_Rd=(O8.*QBC_Rd+O9)./O10;

Efree=0.408.*Rs.*(0.014.*(1.8.*Ta+32)-0.37);

EBCT_Rd=(1-x)*Efree+x*EBC_Rd

% VARIANDO RS
SWs=(1-Alfa).*Rd1;
LWs=(5.67e-8).*(Ta.^4).*(0.56-0.0092.*sqrt(ea)).*(0.1+0.9*0.3);
QBC=SWs+LWs;

```

```

O8=0.408.*Pend;
O9=CtePs.*(900./(Ta+273)).*u.*(es-ea);
O10=Pend+CtePs.*(1+0.34.*u);

EBC_Rs=(O8.*QBC+O9)./O10;

Efree_Rs=0.408.*Rs.*(0.014.*(1.8.*Ta+32)-0.37);

EBCT_Rs=(1-x)*Efree_Rs+x*EBC_Rs

%SISTEMAS FLOTANTES FIGURA 3A,D

%VARIANDO RD
SWfA=0;
SWfD_Rd=Alfa*(Rd+Rb1).*(1-n)*0.4;
LWfAD_Rd=(5.67*10^-8).*(Ta.^4).*(0.56-0.0092.*sqrt(ea)).*0.1;
QcoverA=SWfA+LWfAD_Rd;
QcoverD_Rd=SWfD_Rd+LWfAD_Rd;

Qfree_Rd=(1-Alfa)*(Rd+Rb1)+(5.67e-8).*(Ta.^4).*(0.56-
0.0092.*sqrt(ea)).*0.1;

QA=Qfree_Rd*(1-x)+QcoverA*x;
QD_Rd=Qfree_Rd*(1-x)+QcoverD_Rd*x;

EA=(1-x)*(O8.*(QA-0)+O9)./O10
ED_Rd=(1-x)*(O8.*(QD_Rd-0)+O9)./O10

%VARIANDO RB
SWfA=0;
SWfD_Rb=Alfa*(Rd1+Rb).*(1-n)*0.4;
LWfAD=(5.67*10^-8).*(Ta.^4).*(0.56-0.0092.*sqrt(ea)).*0.1;

Qfree_Rb=(1-Alfa)*(Rd1+Rb)+(5.67e-8).*(Ta.^4).*(0.56-
0.0092.*sqrt(ea)).*0.1;

QcoverA=SWfA+LWfAD;
QcoverD_Rb=SWfD_Rb+LWfAD;

QA_Rb=Qfree_Rb*(1-x)+QcoverA*x;
QD_Rb=Qfree_Rb*(1-x)+QcoverD_Rb*x;

EA_Rb=(1-x)*(O8.*(QA_Rb-0)+O9)./O10
ED_Rb=(1-x)*(O8.*(QD_Rb-0)+O9)./O10

%plot(Rb,EA_Rb,Rb,ED_Rb,Rd,EA,Rd,ED_Rd,'LineWidth',1.5)
%grid minor
%xlabel('\bf Radiación [MJ/m^2d]')
%ylabel('\bf Evaporación [mm/d]')
%title('Evaporación superficies cubiertas con sistemas tipo
flotantes variando radiación y 30% de cobertura')

```



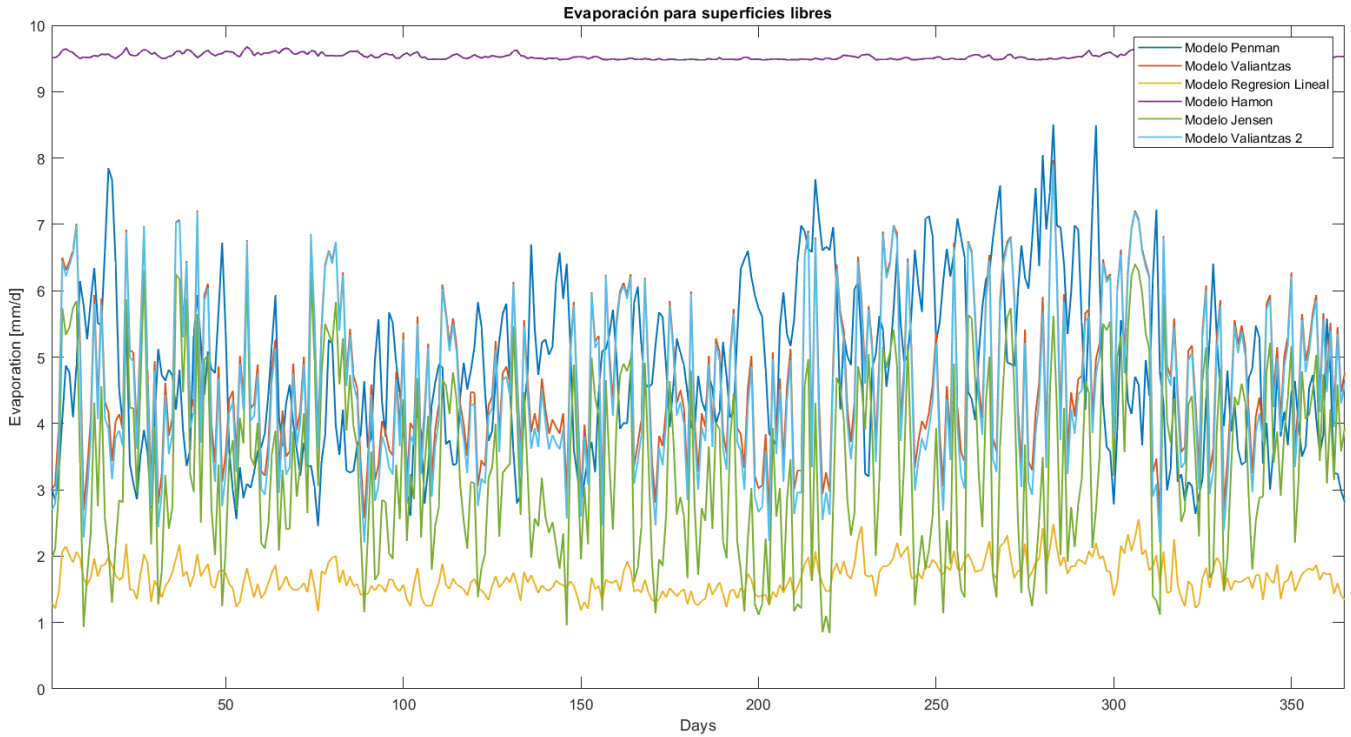
```

%legend('Variando radiación directa en sistemas de la figura 1.4
A','Variando radiación directa en sistemas de la figura 1.4 D',...
% 'Variando radiación difusa en sistemas de la figura 1.4
A','Variando radiación difusa en sistemas de la figura 1.4 D')
%xlim([16.5 87.5])

%plot(Rs,EBCT_Rs,Rd,EBCT_Rd,'LineWidth',1.5)
%grid minor
%xlabel('\bf Radiación [MJ/m^2d]')
%ylabel('\bf Evaporación [mm/d]')
%title('Evaporación superficies cubiertas con sistemas tipo
suspendidos variando radiación y 30% de cobertura')
%legend('Variando radiación global en sistemas de la figura 1.4
BC','Variando radiación difusa en sistemas de la figura 1.4 BC')
%xlim([16.5 87.5])

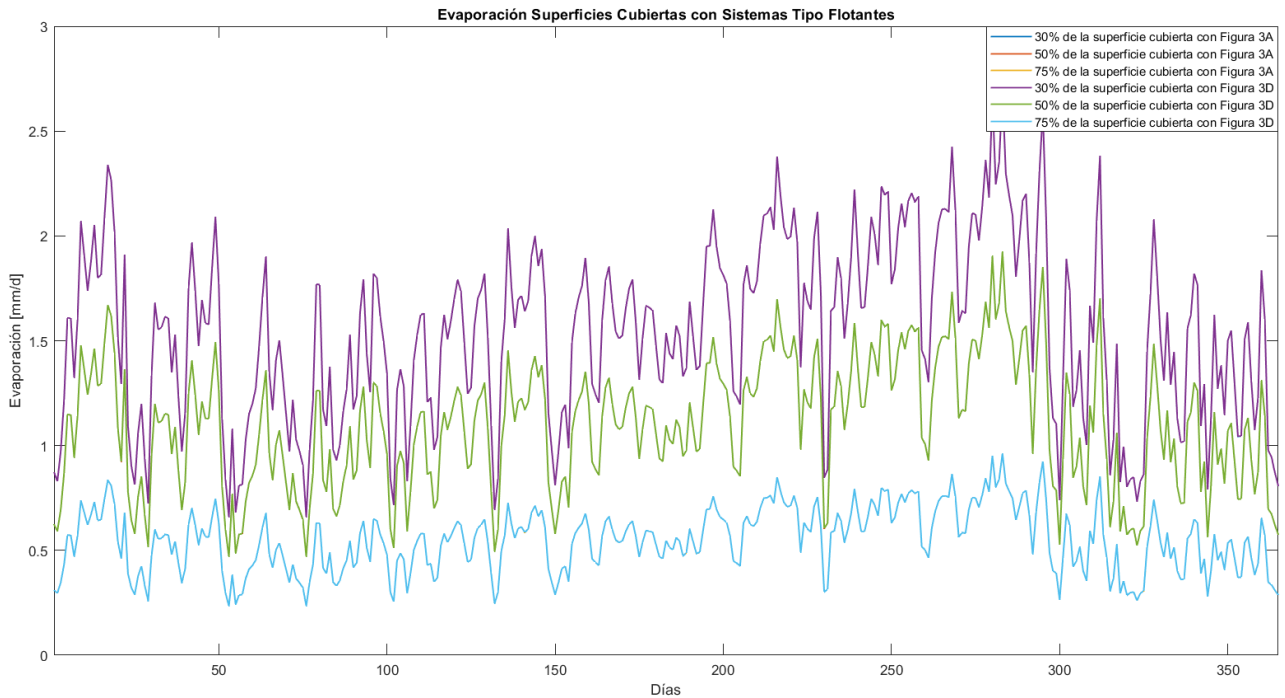
```

## ANEXO II



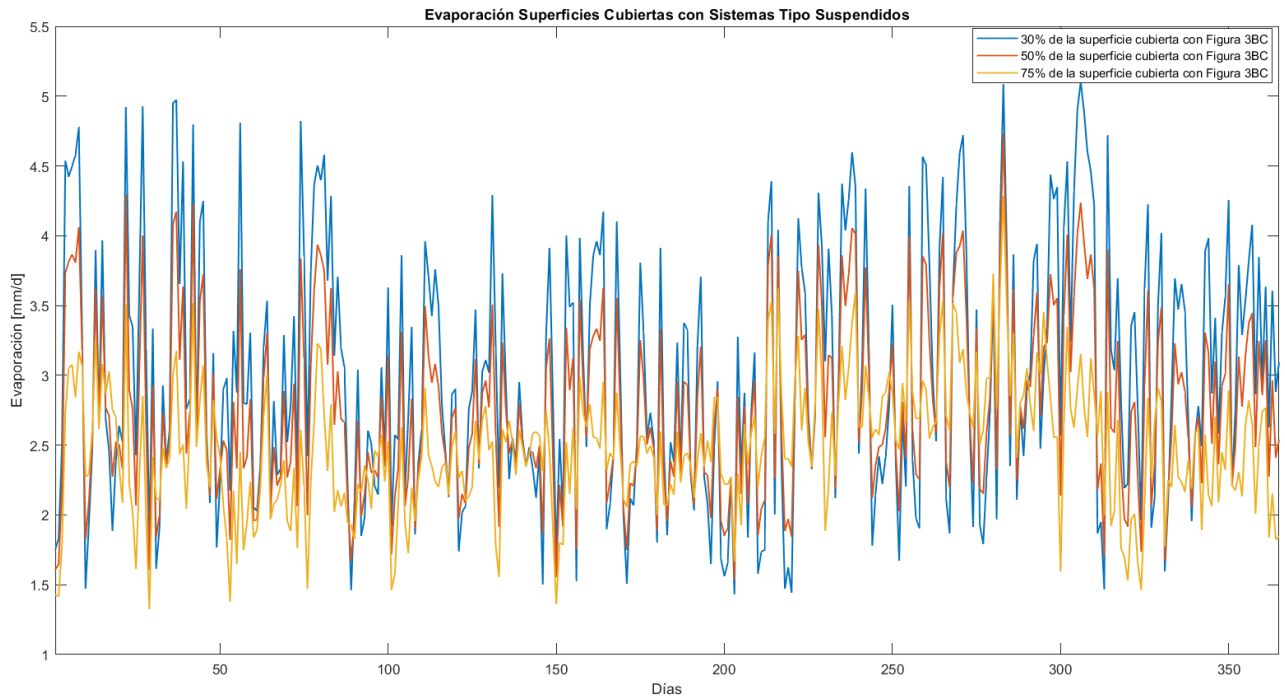
**Figura 5.1.** Evaporación Diaria Superficies Libres

Fuente: Propia



**Figura 5.2.** Evaporación diaria en superficies cubiertas al 30%, 50% y 75% con sistemas tipo flotantes

Fuente: Propia



**Figura 5.3.** Evaporación diaria en superficies cubiertas al 30%, 50% y 75% con sistemas tipo suspendidos

**Fuente:** Propia