



Proyectos fotovoltaicos flotantes (FPV): Consideraciones ambientales, geográficas y sociales para su desarrollo en Colombia.

Autor

Luis Alejandro Aranguren Avila

**Trabajo presentado como requisito para optar por el
título de Magíster en Derecho y Gestión Ambiental**

Tutor

Mauricio Enrique Blanco Redondo

**Facultad de Jurisprudencia
Maestría en Derecho y Gestión Ambiental
Universidad del Rosario**

Bogotá - Colombia

2023

Contenido

Acerca del Autor	3
Tipología de trabajo de grado:	4
Justificación:	4
Introducción:	5
Línea de tiempo y proyectos internacionales FPV:	8
Diseño:	8
Estructuras flotantes:	11
Beneficios y diferencias con respecto a los sistemas fotovoltaicos convencionales.	12
Volúmenes y capacidades de implementación de proyectos de sistemas FPV en Colombia.....	16
Usos y actividades en los embalses evaluados	19
Costos	19
Supuestos para el desarrollo de proyecto	23
Paneles Solares Flotantes Vs Granja Solar Convencional en tierra, ejemplo Calima.	24
Normativa para poder adquirir la autorización ambiental para ejecutar el proyecto.....	27
¿Permiso o Licencia ambiental para un proyecto FPV en embalses?	28
¿Qué impactos ambientales generan los proyectos FPV?	30
¿Cuáles son los impactos sociales?	34
Conclusiones:	34
Bibliografía:	35

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 Línea de tiempo proyectos FPV.	8
Ilustración 2 Representación esquemática de un Sistema solar Flotante FPV típico a gran escala con sus componentes clave.	10
Ilustración 3 Tabla de Datos de embalses en Colombia, datos anuales.	13
Ilustración 4 Mapa Global Horizontal Irradiation (GHI) Promedio año.	16
Ilustración 5 Temperatura del aire y Tamaño de Embalses	17
Ilustración 6 Producción de Energía Fotovoltaica	18
Ilustración 7 Incentivos de Fuentes No Convencionales de Energía.	22
Ilustración 8 Listado de servicios excluidos del IVA y Exentos de gravamen arancelario.	23
Ilustración 9 Tabla de datos del modelamiento de 3 escenarios de perdidas.	26
Ilustración 10 Conozca algunos de los proyectos que buscan avanzar en materia de energía limpia.	33
Ilustración 11 Tabla de Descripción General de Operaciones en el desarrollo de una planta solar flotante fotovoltaica de diferentes capacidades.	34

Acerca del Autor

La presente investigación es resultado del trabajo de grado de la Maestría en Derecho y Gestión Ambiental de la Universidad del Rosario, Bogotá D.C.

Luis Alejandro Aranguren Avila es graduado en Administración de Negocios Internacionales de la Universidad del Rosario, con especialización en Evaluación y Desarrollo de Proyectos. Cuenta con ocho (8) años de experiencia en el sector energético, incluyendo áreas de compras internacionales y la gestión y desarrollo de proyectos en aspectos normativos y comerciales para los mercados de "Oil & Gas" y energía eléctrica en Centroamérica y Sudamérica.

Su experiencia abarca consultoría e inteligencia de mercados, negociación de contratos de Alianzas Estratégicas (Brand Label) con empresas estadounidenses, así como la administración de portafolio de productos de energía para el sector industrial general y especializado. Además, destaca por su habilidad en la integración de proyectos, la promoción de la sustentabilidad empresarial y su experiencia liderando equipos.

Tipología de trabajo de grado:

Con base en este trabajo se desea realizar una presentación de este documento académico mediante un video, video que se publicó en la plataforma Youtube en el canal UR Ambiental y se puede consultar bajo el título “[Plantas solares fotovoltaicas flotantes \(FPV\) por Alejandro Aranguren](#)”. Este video recae en la categoría “Publicaciones editoriales no especializadas”. Además, se desea realizar una infografía el cuál presente de manera concisa diferencias se presentan entre los sistemas FPV y los sistemas fotovoltaicos tradicionales y su potencial de generación en Colombia.

Público Objetivo:

- Desarrolladores de proyectos.

Justificación:

Los proyectos solares flotantes (FPV) están tomando auge en los últimos años¹. Estos proyectos consisten en cambiar la ubicación de generación de energía fotovoltaica; en vez de ubicarlos sobre la tierra estos se colocan sobre superficies de agua. Su principal atractivo está relacionado con evitar la utilización del suelo y con ello disminuir costos de arriendo o compras de terreno, lograr una mayor eficiencia de generación de energía del panel, al usar el enfriamiento natural que brinda el cuerpo de agua al evaporarse.

Con estos proyectos surgen nuevos retos y preguntas por parte de las autoridades ambientales y de los desarrolladores de proyectos. Esta cartilla tiene como objetivo mostrar cuáles deberían ser las características principales para tener en cuenta al momento de querer desarrollar este tipo de proyectos, enfocándose en la fase de prefactibilidad.

Durante la fase de prefactibilidad se pueden presentar inquietudes como: ¿Cuáles son las características para definir los lugares en los que sería mejor desarrollar un proyecto de este tipo (Variables como usos, tamaños, entre otras)? ¿Cuáles son las zonas más convenientes? ¿Cuáles zonas tienen las mejores radiaciones con base en estas características? ¿Cuál puede ser el potencial real en Colombia? ¿Qué impactos sociales y ambientales podría generar? Se quiere dar una respuesta concisa, en la medida de lo posible, y que, resulte sencilla para los actores involucrados en este proyecto, incluyendo a la sociedad que se beneficia del cuerpo de agua en el cual se quiere implantar.

Es importante subrayar que se van a desarrollar unas guías generales, no características específicas de un cuerpo de agua en particular, dado que cada uno puede tener más usos de los esperados y documentados; el ecosistema y las especies pueden variar bastante de uno a otro.

Colombia es dependiente de la generación de energía hidroeléctrica. De acuerdo con la UPME en su página web en el año 2019 Colombia generaba (a través del sistema interconectado nacional SIN) 66,548 GWh de los cuales 44,682 GWh correspondían a generación por centrales hidroeléctricas; esto es aproximadamente un 67% del total de la generación del país, lo cual lo hace dependiente del uso del agua en sus embalses. Y, en este sentido, plantea una serie de desafíos y limitaciones asociados

¹ La primera planta de más de 10 MWp fue instalada en el año 2016, en el año 2018 ya se contaba con la instalación de plantas de más de 100 MWp, incluyendo una planta de 150 MWp instalada en China, en diciembre de 2018 se contaba con un valor acumulado cercano a 1.3 gigawatt-peak (GWp), comparado con un valor de 68 MWp reportado en el año 2015. (World Bank Group et al., 2019b)

a la climatología y a los procesos cada vez más exacerbados por el Cambio Climático. De acuerdo con el documento de titulado “Inventario de las represas de Colombia” por (Barón Cáceres, 2019) y complementado con el estudio hecho por la FAO, en el año 1993, con el fin de verificar y actualizar la información. De estos documentos se puede obtener que Colombia cuenta con aproximadamente 86,134 hectáreas en sus embalses artificiales; esto a su vez, significa que Colombia posee una cantidad grande de embalses para poder generar energía, infraestructura eléctrica cerca a estos y personal capacitado para manejarlos.

Actualmente en Colombia solo hay 2 proyectos piloto, uno por parte de EPM ubicado en el Peñol-Guatapé de 99 Kwp y otro recientemente inaugurado por parte la empresa URRRA S.A. E.S.P. llamado Aquasol de capacidad instalada de 1.52 MWp. En el mundo el mayor desarrollador de proyectos FPV es China con más de 13 proyectos de más de 13 MWp cada uno.

Introducción:

La presente investigación desea analizar el potencial del sistema de generación de energía renovable no convencional de paneles solares fotovoltaicos flotantes o FPV (por sus siglas en inglés) y con ello proponer una manera de ayudar a disminuir emisiones contaminantes y cumplir con los objetivos nacionales y mundiales con respecto a la disminución de emisiones. Estos proyectos generan energía de la misma manera que un proyecto fotovoltaico convencional, sin embargo, la localización donde se van a desplegar estos proyectos es diferente, en este caso son superficies de agua.

La realización de este trabajo surge del interés en querer desarrollar y promover proyectos que puedan ayudar a generar energía renovable, o como se denomina en la legislación colombiana “energía alternativa virtualmente contaminante”, aplicando un enfoque relativamente nuevo y que puede llegar a ser altamente efectivo en el país. En Colombia y en el mundo hay una tendencia a reducir la generación de energía generada usando combustibles fósiles que causan emisiones de gases de efecto invernadero y los cuales se acumulan en la troposfera y causan el fenómeno conocido como calentamiento global. Más allá de que las reservas de combustibles fósiles estén disminuyendo ya se sabe que el uso de estos para la generación de energía es un gran contribuyente al calentamiento global que se debe reducir.

Entre las metas de los objetivos de la agenda 2030, en el punto 7 acerca de la “energía asequible y no contaminante”, se quiere garantizar al acceso universal a los servicios energéticos y aumentar la proporción de energías renovables. Si bien las emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles no son el único factor que incrementa el fenómeno de calentamiento global se desea que al menos la energía eléctrica que usan los usuarios finales en sus casas, oficinas e industrias sea de una fuente menos contaminante.

Para la elaboración de esta cartilla se tomaron 28 embalses con un área igual o mayor de 250 hectáreas, asumiendo que no se va a usar el total del área y partiendo de otros estudios donde se tomaban desde el 1% del área hasta el 60% de la misma. Se considera que tomar menos de 250 hectáreas de área para la realización de este estudio no resultaría en un valor agregado donde se pudieran implantar proyectos de generación que tuviesen un interés principalmente comercial. Partiendo de estas ubicaciones se hallaron las variables para hacer un estudio de potencial de generación de energía en estas ubicaciones, se hallaron también los usos (beneficios para los humanos) que tienen cada embalse y laguna como suministro de agua potable, actividades recreativas y de turismo, actividades económicas, pesca de supervivencia y deportiva, entre otras.

El hecho de ubicar estos proyectos sobre un cuerpo de agua implica cambiar la estructura que consiste principalmente de cuatro elementos: sistema de flotabilidad, de anclaje y amarre, sistema fotovoltaico y cableado especializado debido a su constante contacto con el agua (Choi, 2014, p. 76).

Los proyectos FPV generan una serie de beneficios, entre ellos el de eliminar el costo de adquisición de tierras, que a su vez genera un costo asociado al uso del cuerpo de agua, costo que decidirá la autoridad ambiental si el cuerpo de agua en cuestión es manejado por ellos. También, parte importante de esta cartilla es el de mostrar a la persona de interés los ahorros en emisiones de carbono que se pueden lograr, para esto se debe tomar el factor de emisiones en Colombia para el SIN Sistema Interconectado Nacional, en este caso compete tomar el factor de emisión de la red para proyectos eólicos y solares en 2019 de 0.591 t CO₂eq/MWh dado por la UPME mediante resolución 385 del 2020. Llegar a un consenso sobre que debe ser más importante en este proyecto, si priorizar el enfriamiento del panel para lograr mayores rendimientos de generación de energía o el de mantener la evaporación del cuerpo de agua al mínimo, dado que dependiendo de estas variables cambiará el diseño del sistema que se quiere evaluar.

Establecer la autoridad, persona o empresa que tiene el manejo del cuerpo de agua es uno de los pasos a seguir, dado que normalmente el manejo del cuerpo debería de estar en manos de las Corporaciones Autónomas Regionales CAR correspondiente al sitio. En algunos casos una parte del cuerpo de agua es propiedad de la generadora hidroeléctrica a la cual se le concedió la licencia ambiental para ejercer su actividad, sin embargo, esta cartilla no pretende entrar en este detalle. En Colombia hay distintas autoridades ambientales con jurisdicciones territoriales definidas, en las cuales desarrollan sus funciones de seguimiento y control en el marco de los establecido en la Ley 99 de 1993, que a su vez se diferencian en la capacidad instalada a generarse de acuerdo al decreto 1076 de 2015, si esta capacidad generadora es igual o mayor a 100 MW pico la autoridad competente para dar el permiso ambiental y poder ejecutar el proyecto será al ANLA, en caso contrario las autoridades competentes para evaluar el impacto y la vialidad ambiental serán las Corporaciones Autónomas Regionales (conocidas como CAR).

Mediante este trabajo se quieren lograr los siguientes objetivos: i) Mostrar mediante un video corto el desarrollo de proyectos fotovoltaicos solares flotantes (FPV) en embalses, que incluya la presentación de los posibles impactos ambientales y sociales derivados de la actividad, sobre los cuerpos de agua de Colombia. ii) Evidenciar los beneficios que brinda el gobierno colombiano frente a la realización de proyectos de generación de energía que utilicen fuentes no convencionales y que sean amigables con el ambiente, y aplicarlos en el modelamiento y prefactibilidad durante la etapa de estructuración de un proyecto. iii) Dar a conocer las ventajas de los proyectos solares en cuerpos de agua frente a los mismo en tierra. iv) Determinar las actividades, diferentes a la generación de energía, que se desarrollen en embalses artificiales y que puedan ser disruptivas para el desarrollo económico, cultural o social de las poblaciones aledañas. v) Establecer parámetros actuales para los proyectos solares en Colombia. vi) Identificar ubicaciones donde se estime que se pueda llegar a implantar un proyecto FPV, con sus respectivos indicadores, con las menores implicaciones ambientales y sociales.

La metodología usada para la elaboración de este documento se fundamentó en la revisión de la literatura disponible a nivel nacional e internacional, para posteriormente establecer un marco teórico, conceptual y poder evidenciar unas lecciones aprendidas y casos de éxito, con el fin de efectuar unas recomendaciones generales para ser tenidas en cuenta en el desarrollo de este tipo de proyectos en el país. A nivel internacional la atención recae en estudios de caso, documentos de modelamientos teóricos, sugerencias acerca de diferentes tipos de infraestructura. A nivel nacionales el enfoque tomado fue el de encontrar la potencialidad, disponibilidad, normativa y beneficios para el desarrollo

de proyectos FPV. En los siguientes apartados se pueden ver con más detalle los documentos nacionales e internacionales escogidos su uso principal.

Las condiciones de los embalses en Colombia varían grandemente de acuerdo a su ubicación, se van a ver diferentes parámetros para la temperatura y la altitud de estas zonas, se debe tener en cuenta que en zonas de alta montaña se puede presentar grandes periodos de niebla y nubosidad durante el día (IDEAM & UPME, 2005, p. 25). Se va a usar un enfoque cualitativo en el cual se revisa literatura y, en algunos puntos específicos, los usos que la comunidad le dan a los embalses mediante los permisos expedidos por las autoridades ambientales. También se usará como documentos guías la serie de informes del Banco Mundial *Where Sun Meets Water* donde se explica las variables para tener en cuenta de los proyectos flotantes fotovoltaicos, diferentes tipos de montajes, indicadores financieros preliminares entre otros elementos de utilidad para esta guía.

Se tomará como punto de partida en Colombia los términos de referencia para la elaboración de estudio de impacto ambiental en proyectos de uso de energía solar fotovoltaica expedidos por la ANLA, el manual de seguimiento y el manual de evaluación de estudios ambientales, la ley 1715 de 2014 con su respectiva cartilla expedida por la UPME en donde se establecen los beneficios que brinda el gobierno para desarrollar proyectos de generación de energías renovables no convencionales.

Como referentes internacionales en la aplicación de proyectos FPV, características técnicas e impactos ambientales se toman casos de evaluación de documentos como “A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact”, “Potential of floating solar technology in Malaysia”, la tesis doctoral titulada “Modelado y Análisis de sistemas fotovoltaicos” por nombrar unos pocos.

Se usan distintas bases de datos para recabar datos relacionados con la radiación, nubosidad, altitud y temperatura como el Global Solar Atlas y los distintos atlas del IDEAM.

A grandes rasgos los medios utilizados para realizar esta investigación serán los siguientes:

- Revisión de literatura sobre experiencias con montajes de proyectos FPV internacionalmente.
- Revisión de manuales de implantación de proyectos FPV.
- Revisión de guías para la presentación y evaluación de impactos ambientales en Colombia.
- Revisión de la legislación colombiana con respecto a los beneficios para proyectos fotovoltaicos.
- Términos de referencia para proyectos solares.

Línea de tiempo y proyectos internacionales FPV:

De acuerdo con (World Bank Group et al., 2019b) los proyectos FPV tienen varios hitos, el primero de estos sucedió en Japón, en el año 2007, donde se instaló el primer por primera vez un proyecto FPV, este proyecto consistió de tan solo 20 kWp. En el año 2018 se instaló el primer sistema FPV con uso comercial de 175 kWp, en Estados Unidos; en el año 2010 se instaló el primer FPV con sistema de rastreo en Italia; en el año 2013 se instaló el primer proyecto que mayor a 1 MWp en Japón; en el año 2016 se instaló un proyecto FPV usando micro inversores, igualmente en Japón; y en el año 2017 se combina la generación FPV con la generación hidroeléctrica.

Como se puede apreciar en los hitos anteriormente mencionados Japón juega un rol importante central en el desarrollo de los proyectos FPV y sirvió como pionero de esta tecnología.

Como se muestra en la Ilustración 1 el progreso de los proyectos en el mundo no se empezó a dar sino hasta el año 2015. En el año 2014 habían solo 11 MWp en el mundo de capacidad instalada, en el año 2015 este número sube a 68 MWp, instalando en este año 57 MWp y en el 2016 instalando otros 101 MWp. En el año 2017 China fue el único país que instaló proyectos de más de 5 MWp. En el año 2018 China sigue liderando en la cantidad de generación pico instalada.

Al año 2018 la matriz de generación energética global a través de generación FPV contaba con 1314 MWp de capacidad instalada, China dominaba esta matriz contando con aproximadamente un 73% de esa generación y en segundo lugar Japón con un 16%. Solo entre China y Japón generaban un poco menos del 90% de energía de proyectos FPV.

Diseño:

El sistema fotovoltaico flotante, aunque en principio está compuesta por los mismos componentes que un sistema convencional ubicado en tierra, tiene una serie de factores que afectan a los componentes, que no están presentes en las instalaciones en tierra. Se verá con más detalle cuales son estos factores y en qué medida suceden estas afectaciones. En síntesis, tomando los documentos de (Guash Murillo, 2003) y (World Bank Group et al., 2019a), estos sistemas tienen como componentes: baterías, paneles solares, reguladores de carga, inversores, convertidores, controladores para conexión



Ilustración 1 Línea de tiempo proyectos FPV.

Fuente: (World Bank Group et al., 2019b, p. 2)

a red eléctrica externa, sistemas de pérdidas y sistemas de apantallamiento puesta a tierra. El que esta trabaja va a usar será un sistema modular. El cableado debe tener unas consideraciones especiales dependiendo del diseño que se quiera escoger, puede ser cableado que flote en el agua o cableado que pueda sumergirse.

Hay varias estructuras que se han puesto en funcionamiento con sistemas flotantes solares consistiendo principalmente en su manera de organizar la posición de las islas de paneles solares y el lugar en donde se van a localizar. Por encima del agua, son los sistemas a los que se va a enfocar este documento, básicamente sistemas flotantes que tienen una estructura la cual se mantiene en pie y flotando sobre el agua debido a las balsas que las sostienen. En el agua donde los paneles solares tienen contacto directamente con el agua, pero no están completamente sumergidos, normalmente las balsas que sostienen el sistema están en los lados y no en la parte de abajo del sistema. Y, por último, el sistema sumergido dentro del agua que consiste en hundir o sumergir los paneles solares, no dejándolos descansar en suelo del cuerpo de agua sino manteniéndolo en una profundidad predeterminada. Todos los sistemas anteriormente mencionados se evaluaron para comprobar que tanta eficiencia más ganaban los sistemas al trabajar a menor temperatura.

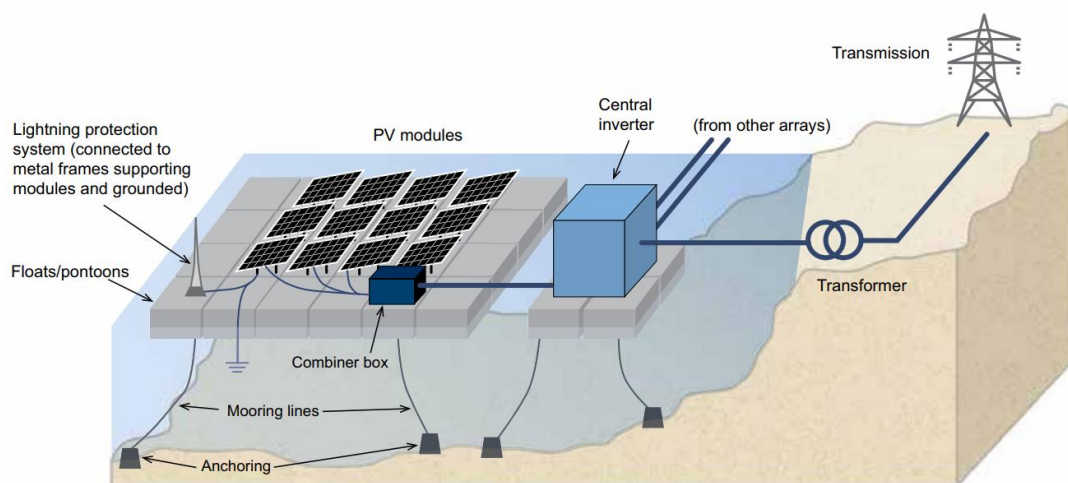
En este documento nos vamos a concentrar en las estructuras puesta por encima del agua usando flotadores o balsas por panel solar y de implantación modular. Este sistema consiste en que cada panel maneja su propio flotador que después se conecta con los demás flotadores y la estructura en general. La idea de este sistema modular es poder hacer el ensamblaje en tierra con sus conexiones eléctricas. Una vez se tiene listo el sistema ensamblado se despliega en el cuerpo de agua o, dependiendo de qué tan rígido o flexible sea la estructura, también se puede ir desplegando paulatinamente, cuando una sección esta lista.

Para empezar el diseño se debe establecer consideraciones como: ¿Qué escala va a tener el proyecto? cuanta energía se desea generar y cuanto equivaldría esto a la superficie a cubrir del cuerpo de agua; ¿Desea dar prioridad al rendimiento de los equipos usando el sistema natural de evaporación del cuerpo de agua o la prioridad es minimizar la evaporación en el cuerpo de agua? ¿Es el cuerpo de agua seleccionado idóneo para esta actividad sin afectar otras actividades o usos de este? ¿Es la protección del cableado el adecuado teniendo en cuenta el contacto que va a tener con el cuerpo de agua? ¿Es mi sistema de flotabilidad compatible con los paneles a usar y, de ser necesario, los inversores a ubicar sobre el sistema? ¿Puedo acceder fácilmente al sistema para poder ejecutar actividades de mantenimiento y reemplazos? ¿Se puede acceder al sitio para realizar actividades de montaje de paneles y equipos eléctricos en tierra, y desplegar el sistema sobre el cuerpo de agua con facilidad?

Existen una serie de factores que producen pérdidas en la generación solar convencional que se deben mencionar, sin embargo, para tener un cálculo más exacto del rendimiento esperado es necesario contratar personal y softwares especializados. Entre las pérdidas a tener en cuenta están: la contaminación del aire; suciedad en el panel debido a animales, polvo y las condiciones ambientales; las sombras generados por objetos cercanos y por la infraestructura del mismo sistema; el ángulo de incidente, idealmente los rayos del sol deben poder impactar de forma perpendicular; baja irradiancia, a bajas intensidades de luz la eficiencia del panel decae; temperatura del módulo o panel solar; calidad del módulo; incompatibilidad entre módulos; degradación del módulo, se vuelve menos eficaz el módulo a través de los años; desempeño del inversor; rastreo del punto de máxima potencia o MPP; reducción de rastreo debido a fuertes vientos; el rendimiento del transformador; pérdidas por cables AC y DC; energía auxiliar; tiempo fuera de funcionamiento debido a fallas; disposición de una red

de energía para distribución y transmisión, y la interrupción de la misma; y inestabilidad de la red (World Bank Group, 2015, pp. 53–54).

FIGURE E.1 Schematic representation of a typical large-scale FPV system with its key components



Source: Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS) at the National University of Singapore.

Ilustración 2 Representación esquemática de un Sistema solar Flotante FPV típico a gran escala con sus componentes clave.

Obtenido de: (World Bank Group et al., 2019b, p. 2)

Hay varios aspectos de las estructuras que el diseñador debe considerar, aunque su estructura en esencia sigue siendo la misma, excluyendo casos en concreto y decisiones como si dejar los inversores en tierra o en agua, si se va a interconectar con un sistema de generación hidroeléctrica, entre otras consideraciones de diseño. En la Ilustración 2 se muestran las partes principales del sistema asumiendo que la energía generada va a ser inyectada a la red y no se almacenará en baterías, no hay interconexión con generadores hidroeléctricos sino energía inyectada directamente a la red y los elementos eléctricos están todos sobre el agua.

Todas las preguntas enunciadas anteriormente son necesarias para empezar la modelación económica y, además, establecer los requerimientos básicos de funcionamiento y propósito. Es necesario saber que supuestos se van a usar y que supuestos se han usados en la elaboración de otros proyectos.

Entre las características claves para comenzar el proyecto deberán estar:

- Vida útil del sistema flotante fotovoltaico. En proyectos similares se ha tomado una vida útil de 25 años.
- Tipo de balsa o flotador a usar y el material del cual va a estar hecho. Flotador y balsa tipo pontón de polietileno de alta densidad HDPE.
- Las características del panel solar a usar, medidas, peso y si requiere algún tipo de certificación internacional o nacional.
- En el caso de Colombia el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE muestra una tabla en su artículo segundo, numeral 2.3. Los productos que estén enunciados en dicha tabla deberán tener certificado RETIE para poder ser importados y utilizados, entre estos productos están paneles solares, cables y muchos de los insumos que se utilizaran en el desarrollo de proyectos FPV.

- Establecer si los inversores se ubicaran sobre el agua en plataformas flotantes, similar al montaje de los paneles, o en tierra.
- El espacio (en milímetros o centímetros) de los corredores de acceso para el mantenimiento y operación del sistema, y el espacio entre módulos solares para minimizar la generación de sombras.
- Establecer la profundidad del cuerpo de agua en temporadas secas y en temporadas de lluvias tomando en cuenta la precipitación del área a intervenir para poder establecer la longitud del sistema de amarre.
- El ángulo de inclinación al cual se van a montar los paneles. Más adelante en la ilustración 3 se muestra una tabla de datos con ángulos de inclinación sugeridos para cada cuerpo de agua tomado en cuenta, de acuerdo con los datos extraídos de la página Global Solar Atlas, sin embargo, se recomienda realizar sus propios cálculos teniendo en cuenta los excrementos de aves, resistencia del aire contra el panel solar y ángulo óptimo de recepción del sol.

Aunque en esta cartilla se toman cuerpos de agua que están en el interior del país (inland) y por tanto no son tan susceptibles a las grandes mareas y olas que están presentes en la costa es necesario tener en cuenta factores como velocidad del viento, botes, motos acuáticas o elementos utilizados que puedan alterar la superficie agua y producir olas en el mismo, más aún cuando el cuerpo de agua posee un área amplia.

A modo de ejemplo, en Japón se realizó un proyecto FPV en un embalse artificial y debido a las altas velocidades del viento del tifón número 9 un extremo del FPV modular se giró y solapo con los otros paneles solares del mismo proyecto (Rosa-Clot & Tina, 2018, p. 117). La mayor velocidad promedio anual del viento está ubicada en la zona de la costa caribe sobre el mar entre los puntos bocas de ceniza en el departamento del Atlántico cerca de la ciudad de Barranquilla y cabo de la aguja en el departamento de Magdalena cerca de la ciudad de Santa Marta, en este punto la velocidad del viento puede ir desde los 10 m/s hasta los 13 m/s (Serna Cuenca & Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2015). En el territorio continental la velocidad del viento promedio anual no supera los 8 m/s.

En conclusión, hay varios factores que se debe tener en cuenta al momento de diseñar e implementar el sistema de flotabilidad, tales como: modularidad, flexibilidad, robustez, seguridad, tamaño óptimo del flotador/balsa, simplicidad de lanzamiento (Rosa-Clot & Tina, 2018), velocidad del viento, diseño de la isla, entre otros.

Estructuras flotantes:

El sistema de flotabilidad consiste en dos partes: el flotador y la estructura que los conecta, en la cual van a estar principalmente los paneles fotovoltaicos y, de ser requerido, los inversores. ¿Cómo esta estructura se va a mantener fija en el lugar deseado? Las formas más comunes para abordar este problema son atar la estructura a una serie de anclas debajo del agua o atar la estructura en la tierra cerca de la costa donde este ubicado el proyecto.

Las estructuras que se usan hoy en día se pueden reducir básicamente en dos tipos, ambos son modulares, pero su robustez, simplicidad y facilidad de montaje varían, también es necesario saber de antemano si se quiere poner en marcha un sistema de rastreo, el cual consisten en monitorear el

sol y que la estructura gire dependiendo de la ubicación de este, esto se usa para tener mayor generación energética.

El primer concepto es combinar una serie de balsas o pontones con una estructura de acero galvanizado, esta estructura esta sostenida mediante tubos de polietileno y se utiliza frecuentemente para sistema de rastreo (Cazzaniga et al., 2018, pp. 1732–1733). El segundo sistema fue expuesto por la empresa Ciel et Terre, este sistema consiste en el desarrollo de un flotador o pontón fabricado de polietileno de alta densidad (HDPE) el cual puede sostener un panel y puede ser conectado con otras balsas con tornillos plásticos, aunque este diseño no está pensado para tener un sistema de rastreo, es más fácil de instalar modularmente y, al mismo tiempo, ir desplegando el sistema paulatinamente según se vaya instalando.

El diseño modular permite que el tamaño de las granjas solares sea escalable, en otras palabras, que se puedan ir agregando más paneles y equipos eléctricos a su estructura núcleo de ser necesario. Los conectores semi rígidos o flexibles son usados usualmente para conectar los módulos flotantes juntos y mitigar la concentración de estrés en la conexión bajo la acción de las olas (Dai et al., 2019). Es necesario tener en cuenta que las balsas en los sistemas FPV tienen normalmente un rango de grados de inclinación fijo (e.g. 5°-20° de inclinación), se suele sugerir que el grado de inclinación sea de al menos 10° para que la suciedad que se acumula en el panel pueda lavarse naturalmente con las lluvias, sin embargo, si se desea implantar un sistema de circulación de agua para mantener los paneles funcionando a menor temperatura y con agua constante se podría evaluar el ángulo más óptimo para la generación de energía ya que no dependería de las lluvias para eliminar el polvo o excremento de aves de los paneles solares.

Los sistemas flotantes consisten principalmente de los siguientes componentes: Pontón (término más conocido en inglés como Pontoon) hecho típicamente de polietileno de alta densidad (HDPE), a su vez, los flotadores o la estructura que une a todas estas piezas es hecho del mismo material y se requieren que ambos posean una resistencia contra rayos UV. Es necesario subrayar que dentro del peso de carga que debe soportar la estructura se debe tener en cuenta que en esta estructura no van a ir solo paneles solares, también habrá corredores para las personas que realizan trabajos de mantenimiento y, dependiendo del caso, puede haber equipos electrónicos como inversores, por esto es necesario tener en cuenta el peso de las cargas que estos flotadores pueden aguantar y si es más conveniente usar una estructura más modular o una más compacta.

Beneficios y diferencias con respecto a los sistemas fotovoltaicos convencionales.

Como se habló en la sección anterior uno de los beneficios del sistema solar flotante es la modularidad y facilidad de despliegue (la cual se vuelve más sencilla dependiendo del sistema que se elija). Al utilizar paneles solares de silicio cristalino hay pérdidas térmicas (debido al calor) de cerca de 0.45% por cada grado Celsius (°C) (Cazzaniga et al., 2018, p. 1734), esto significa que a mayor temperatura de operación mayores pérdidas de generación energética. Los módulos solares son usualmente puestos a prueba bajo una temperatura de operación de 25°C, cada grado por encima de esta temperatura va a suponer una pérdida en la eficiencia de generación de energía dada por el fabricante.

Otro factor relacionado es la ventilación que el sistema posea, entre más cerca del agua este el sistema FPV y entre más cerca estén los paneles menos ventilación habrá. Al haber menos ventilación la

reducción de temperatura va a ser menos eficaz y el coeficiente de perdidas por calor (o valor-U) va a ser mayor (Liu et al., 2018).

En ciertas zonas del mundo cuando el indicador de “Global Horizontal Irradiation” o GHI es mayor a 1600 kWh/m²/año las ganancias de generación de los sistemas FPV son de alrededor de 10% mayor comparadas con la misma generación en el mismo sitio con sistemas solares puestos en tierra (World Bank Group et al., 2019a, p. 139), esto debido a la evaporación natural del agua y el efecto de enfriamiento que tiene esta en el sistema. Los estudios preliminares muestran que las ganancias extras de energía son mayores en climas más calientes comparados con climas templados. De acuerdo con la tabla de los 28 embalses evaluados solo 2 lugares tienen este indicador menor a la 1600 kWh/m²/años ubicados en Cundinamarca (Chuzá y Muña), en ningún caso siendo este indicador menor a 1400. Los 26 lugares restantes con GHI mayor a 1600 enunciados tienen unos beneficios de generación de energía 10% mayores a los sistemas solares ubicados en tierra en estos mismos puntos, que podrían llegar a ser aún mayores a este porcentaje.

N°	Nombre	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Área (ha)	Specific photovoltaic power output (Kwh/kwp)	Global horizontal irradiation (Kwh/m2)	Air temperature (°C)	Terrain elevation (m)
1	Betania	Yaguara	Huila	2.670329	-75.50006	7,000	1,514	1,918	23.7	563
2	Peñol	El Peñol	Antioquia	6.257248	-75.189795	6,240	1,647	2,032	16.9	1882
3	Prado	Prado	Tolima	3.756648	-74.883686	1,254	1,477	1,921	29.7	485
4	Salvajina	B/Aires	Cauca	2.87745	-76.6898	2,031	1,582	1,991	21.8	1147
5	Chivor	Santa María	Boyaca	4.948913	-73.325526	1,300	1,414	1,730	18.6	1269
6	Tomine	Sesquile	Cundinamarca	4.945759	-73.843768	3,778	1,467	1,799	14.8	2583
7	Calima	Calima	Valle	3.889897	-76.497162	1,934	1,453	1,801	20.7	1440
8	Guajaro	Repelón	Atlántico	10.506799	-75.028398	16,000	1,615	2,029	28	4
9	Jaguas (San Lorenzo)	Alejandro	Antioquia	6.380435	-75.009536	1,060	1,588	1,982	19.8	1250
10	Chuzá	Fomeque	Cundinamarca	4.591143	-73.703215	537	1,206	1,435	9.9	3025
11	Miraflores	Carolina	Antioquia	6.768508	-75.327572	815	1,542	1,891	16.1	2063
12	Neusa	Cogu	Cundinamarca	5.159198	-73.953702	955	1,344	1,625	13	2969
13	Arroyo Grande	Ma. La Baja	Bolivar	9.878681	-75.311373	1,240	1,514	1,903	27.6	61
14	Arroyo Matuya	Ma. La Baja	Bolivar	9.920122	-75.25471	1,400	1,501	1,891	27.7	55
15	Sisga	Tocancipa	Cundinamarca	5.067627	-73.715441	700	1,403	1,702	13.1	2677
16	Playas	San Rafael	Antioquia	6.316887	-74.959518	3,200	1,577	1,983	21.3	995
17	Punchina	San Carlos	Antioquia	6.212425	-74.845815	340	1,544	1,933	22.4	782
18	Muña	Sibate	Cundinamarca	4.517674	-74.248976	933	1,244	1,524	16.5	2688
19	Troneras	Carolina	Antioquia	6.774383	-75.254874	465	1,620	2,008	17.6	1789
20	San Silvestre	B/Bermeja	Santander	7.091575	-73.814471	250	1,575	2,001	27.8	67
21	Guavio	Ubalá	Cundinamarca	4.693497	-73.509977	15,000	1,387	1,683	16.6	1619
22	Sogamoso	Girón	Santander	7.101159	-73.407988	7,000	1,463	1,817	26.7	214
23	Porce III	Amalfi	Antioquia	6.940475	-75.138578	461	1,428	1,818	22.8	624
24	Miel I	Norcasia	Caldas	5.564254	-74.884148	1,220	1,553	1,914	23.9	529
25	Urra I	Tierralta	Córdoba	7.937494	-76.289703	7,400	1,452	1,823	26.3	116
26	San Rafael	La Calera	Cundinamarca	4.706769	-73.990577	371	1,423	1,748	14.1	2778
27	Rio Rancheria	San Juan	La Guajira	10.909675	-73.015616	2,480	1,694	2,104	24.3	347
28	La Copa	Toca	Boyaca	5.608718	-73.194583	770	1,535	1,863	13.9	2657

Ilustración 3 Tabla de Datos de embalses en Colombia, datos anuales.

Fuente: Elaboración propia. Estimación promedio anual tomando datos de Global Solar Atlas, (Palacios Sierra, 2013) y (Juárez Palacios et al., 1993).

Debido a lo anterior hay técnicas para mantener estas pérdidas al mínimo posible, entre ellas están los sistemas de bombeo de agua a los paneles o la evaporación natural del agua que enfría los paneles solares que están encima. Los cálculos necesarios para saber la efectividad de un sistema natural de evaporación del agua para enfriar los paneles se explican con mayor detalle en el documento “Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics”.

Ahora bien, los sistemas de bombeo difieren según el dispositivo que se desee usar, sin embargo, funcionan del mismo modo al usar un sistema de bombeo el cual toma el agua, del cuerpo de agua sobre el cual está ubicado el sistema, y la circula usando una bomba, enviándola al dispositivo que se desee usar. Según (Cazzaniga et al., 2018) se plantean dos tipos de dispositivos, el primer dispositivo es el velo de agua que consiste en generar una delgada capa de agua sobre la superficie del panel, en ese ejemplo se bombea el agua por una manguera a la cual se le abren unos agujeros y estos agujeros son los que suministran este velo de agua sobre el panel. Entre los beneficios que se muestran en días soleados y calientes los paneles pueden tener una generación de hasta un 15% más. El velo de agua reduce a cero los efectos de choque térmico y disminuye los efectos de degradación de los paneles solares. Se estima que es necesario una bomba de 1kW que pueda suministrar de 1-2 L/min para poder cubrir 1000 paneles solares en una hora. Se concluye con que alrededor de solo 0.25% de la energía generada es usada en este sistema de velo de agua.

El segundo sistema funciona con rociadores comerciales usados para irrigar los cultivos en la agricultura o el césped en el jardín de las casas. Para este sistema, aunque no muestran cifras, se dan 2 conclusiones. La primera conclusión es que la mejor opción para el enfriamiento del panel es enfriar las superficies frontal y trasera. La segunda conclusión es la reducción del costo de irrigación. Sin embargo, los autores advierten que no es posible hacer una comparación dado que solo el sistema de velo de agua es el que se ha probado en plantas solares flotantes (FPV).

Hay varios autores que describen múltiples beneficios de los sistemas FPV, sin embargo, la lista más completa y sintetizada es la expuesta por (Haas et al., 2020), en donde se mencionan las siguientes características:

- Falta de usos que compiten por el uso de la superficie del agua (excluyendo las actividades de recreación).
- Facilidad en la preparación del sitio, dado que no se requiere nivelar el suelo, y el lanzamiento modular baja los costes totales.
- Puede reducir de las pérdidas de agua que ocurren debido a la evaporación, alcanzando hasta un 90%.
- Puede llegar a limitar el crecimiento de algas y así mejorar la calidad del agua indirectamente.
- Mejora la generación solar debido a bajar la temperatura de funcionamiento (explicado anteriormente), falta de estructuras que generan sombras con altos albedos (reflexiones de luz del sol), mejorando así la generación solar.

El control de crecimiento de microalgas se evalúa mediante softwares, utilizando el embalse Rapel en Chile, en el documento desarrollado por (Haas et al., 2020, p. 2). El objetivo al limitar el crecimiento de algas es atenuar severos efectos de la contaminación del agua.

Se toma como indicador principal el total de la Clorofila-a generada bajo las condiciones modeladas, y el indicador de calidad de agua segura para ambientes recreacionales en el agua dado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 10 µg/l de Clorofila-a. Como conclusión, para evitar el crecimiento de algas en el embalse evaluado se tiene que cubrir el 40% o más de la superficie del embalse, sin embargo, al cubrir el 60% o más del embalse se puede poner en riesgo la ecología del embalse al restringir la transferencia de carbón.

En el mismo estudio se desean encontrar los mejores puntos de optimización entre ingresos de la operación híbrida entre el sistema FPV, la hidroeléctrica y la ecología del embalse, tomando como supuesto que por cada hectárea se puede instalar 0.5 MWp de generación FPV. Como conclusión de

esta modelación se obtiene que cubrir entre un 40% y un 60% sería de la reserva da un punto óptimo en el cual se controla el crecimiento de algas y las pérdidas económicas de la hidroeléctrica se mantienen por debajo de un 5%. En este estudio se recalca que los resultados son solo válidos para ese sitio en particular y que la ecología de cada cuerpo de agua es diferente y depende de diversos factores, sin embargo, la metodología usada se puede aplicar para desarrollar sus propios estudios.

Las plantas solares flotantes, al estar ubicadas en embalses, tendrán una cercanía a las hidroeléctricas en funcionamiento, abriendo la posibilidad de poder trabajar con una operación híbrida de generación energética. Una operación mixta tendría beneficios para ambas operaciones como la estabilización de la generación solar, que depende bastante de los factores climáticos como nubosidad y posición del sol; poder hacer uso de la infraestructura de la planta hidroeléctrica (como líneas de transmisión, transformadores, entre otros); mayor generación energética, y por tanto, inyección a la red de la misma; los recursos acuáticos y la energía solar se compensan uno al otro cuando hay cambios de temporadas, en las estaciones más secas la energía fotovoltaica tiene un mejor desempeño debido a que la radiación captada es mayor, las reservas de agua en el embalse decaen y por tanto la capacidad de generación de la operación hidroeléctrica es menor, en las temporadas de lluvias se invierte este fenómeno teniendo menores desempeño la energía solar y un mayor potencial la energía hidroeléctrica.

Por último, es importante recalcar que los costos de los proyectos solares ubicados en tierra no consisten solamente en la compra de predios, también incluyen la preparación del área con mediante obras civiles y fundaciones, costos de operación y mantenimiento debido a operaciones de deshierbado y limpieza del panel (Cazzaniga et al., 2018, p. 1731), la cual generalmente requiere agua y al tener este recurso literalmente debajo del sistema abarata los costos del mismo.

Otro de los beneficios que se han visto en otros estudios es que mediante la cobertura que el sistema tiene en el agua se pueden reducir la evaporación de esta. De acuerdo con (Cabrera-Tobar et al., 2016) en un experimento realizada en donde se cubrió el 95% de la superficie se logró evitar la evaporación del cuerpo de agua en más de un 90%. Estos resultados experimentales son prometedores dado que nos dan más herramienta para cuidar efectivamente del recurso acuático.

Volúmenes y capacidades de implementación de proyectos de sistemas FPV en Colombia.

Los indicadores de Irradiación Horizontal Global (o GHI en inglés) y el indicador Producción de Energía fotovoltaica específica son los puntos de partida desde el cual se comienza a elaborar un análisis detallado de generación real, teniendo en cuenta los factores que inciden para generar más o menos energía.

Global Horizontal Irradiation

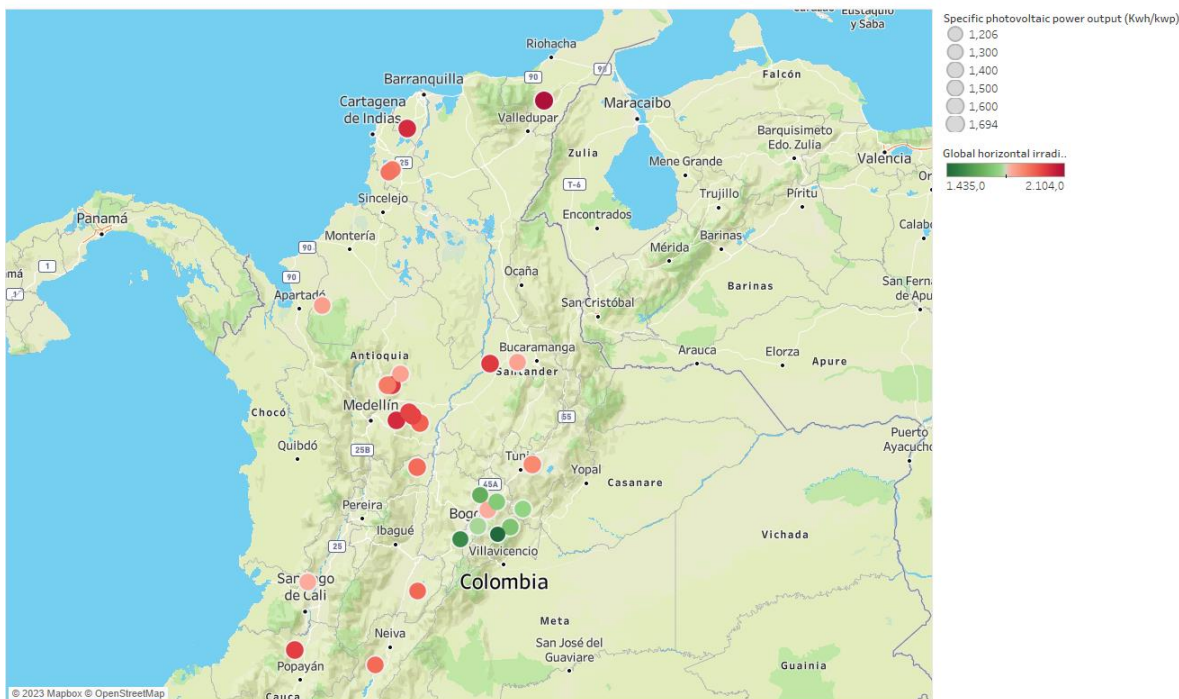


Ilustración 4 Mapa Global Horizontal Irradiation (GHI) Promedio año.

Fuente: Elaboración propia tomando datos de Global Solar Atlas

En Colombia hay varios embalses por el país, como se muestran en las ilustración 4, 5 y 6. Estos embalses usualmente están ubicados geográficamente a centro urbanos altamente poblados, ciudades como Cali, Barranquilla, Medellín, Cartagena, Popayán, Bogotá, Neiva, Tunja, Bucaramanga, Barrancabermeja, entre otros. Al estar geográficamente cerca de estos centros urbanos se disminuyen las pérdidas derivadas de la transmisión de la energía; entre más cerca estén los consumidores finales menores pérdidas por transmisión de energía se genera.

Estos embalses se pueden asociar en 5 grandes clústeres, en otras palabras, varios embalses cercanos geográficamente. El primer clúster ubicado geográficamente cerca de la ciudad de Bogotá, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, encontraremos los embalses Muña, San Rafael, Guavio, Chuza, Neusa, Tomine, Sisga, Chivor y La Copa. Este es el clúster que tiene un menor indicador GHI, siendo los embalses Chuza y Muña los que poseen un indicador menor a 1600 kWh/m²/año, lo que esto indica es que probablemente van a lograr una ganancia extra de generación energética no mayor al 10%, siendo comparados con los sistemas fotovoltaicos puestos en tierra.

Temperatura del aire y tamaño embalses



Ilustración 5 Temperatura del aire y Tamaño de Embalses

Fuente: Elaboración propia tomando datos de Global Solar Atlas

El segundo clúster estaría en la región de Antioquia, cerca de Medellín, en los departamentos de Antioquia y Caldas, allí se encuentran los embalses Peñol, Jaguas, Playas, Punchina, Troneras, Miel I, Porce III y Miraflores. El indicador GHI más bajo de la zona es Porce III con un indicador de 1817 kWh/m²/año y el GHI más alto lo tiene El Peñol con 2032 kWh/m²/año.

El tercer agrupamiento será el de los departamentos de Atlántico, Bolívar y La Guajira estaría cerca de las ciudades Barranquilla y Cartagena y la población de San Juan. Los embalses aquí ubicados son Arroyo Grande, Arroyo Matuya, Guajaro, y Rio Rancheria, teniendo Arroyo Matuya el más bajo GHI de 1891 kWh/m²/año y Rio Rancheria el más alto con 2104 kWh/m²/año.

El cuarto clúster cubriría los departamentos de Huila, Tolima, Valle del Cauca y Cauca, con cuatro embalses respectivamente que serían Betania, Prado, Calima y Salvajina. En esta agrupación el lugar con GHI más bajo sería Calima con 1801 kWh/m²/año y el más alto sería Salvajina con un indicador de 1991 kWh/m²/año.

El quinto y último clúster sería también el más pequeño en términos de cantidad de embalses, este se ubicará en el departamento de Santander, cerca de las poblaciones de Bucaramanga y Barrancabermeja, y tendrían dos lugares San Silvestre y Sogamoso, el menor indicador GHI lo tiene Sogamoso con 1816 kWh/m²/año y San Silvestre tiene un indicador de 2001 kWh/m²/año.

Es necesario resaltar que los embalses con mayor superficie para ubicar proyectos FPV, en este caso que tengan una superficie mayor a 6000 hectáreas y que a su vez tienen indicadores bastante buenos

para favorecer la generación solar (un GHI mayor a 1600), corresponden a los embalses Guajaro y El Peñol; con indicadores GHI superiores a los 2000 kWh/m²/año, Betania con un indicador superior a 1900, Sogamoso y Urra I con indicadores superiores a 1800 y por último Guavio con un indicador de 1681 kWh/m²/año. Estos seis embalses representan más del 68% del total de la superficie de los embalses evaluados, siendo los embalses Guajaro y Guavio los de mayor superficie con una diferencia de casi el doble de superficie con el tercero, el doble en Betania y Sogamoso y más del doble en el Peñol.

Si nos comparamos con países que han instalado una gran capacidad de generación solar y con potenciales de radiación mucho menores como los son Alemania, con un poco más de 53,000 MWp instalados, o Reino Unido, con más de 13,000 MWp instalados; países que tienen un indicador GHI mucho menor al de Colombia en promedio, nuestro país tiene un potencial solar enorme, más aún si combinamos ese potencial con nuestra matriz actual de generación hidroeléctrica, siendo esta un poco más del 67%.

Todos los embalses mencionados tienen una extensión mayor a 250 hectáreas, de acuerdo con la Tabla 1, y un índice GHI mayor o muy cercano a los 1600 kWh/m²/año. Si suponemos que por cada hectárea se puede instalar 0.5 MWp y que solo vamos a instalar el 20% (aproximadamente 17,200 hectáreas) de la superficie de los embalses aquí mencionados la capacidad instalada sería de alrededor de 8613 MWp. Una de las metas de Colombia en su agenda 2030 es aumentar su capacidad instalada de generación de 16,420 MW a 19,159 MW, basándonos en el anterior ejercicio realizado de ubicar proyectos FPV en los embalses evaluados en solo el 20% del área esta sería una solución directa para lograr este objetivo. Además, dado que las poblaciones tienden a tener un cuerpo de agua en las cercanías para la ejecución de diversas actividades económicas y productivas hay una gran probabilidad que las mismas comunidades se puedan beneficiar de estos proyectos FPV, incluso brindando energía a los sectores que no tienen acceso al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Specific Photovoltaic Power Output

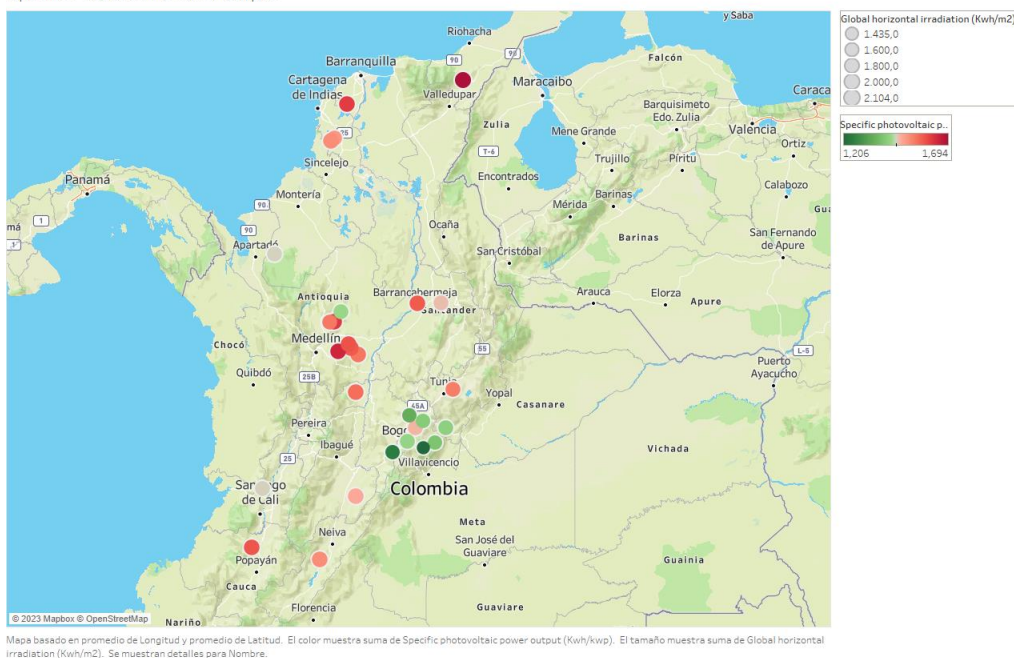


Ilustración 6 Producción de Energía Fotovoltaica

Fuente: Elaboración propia tomando datos de Global Solar Atlas

Usos y actividades en los embalses evaluados

Una parte vital de este ejercicio es saber qué área se debería utilizar del embalse para poder lograr la mayor cantidad de generación y a su vez no causar disrupción de las actividades que se desarrollan en el cuerpo de agua, esto se hizo mediante la consulta en internet de las distintas actividades ofertadas por embalse.

Algunos embalses, como el embalse de Chuza, están ubicadas en áreas de protección; en este caso en el Parque Nacional Natural Chingaza, y por tanto las actividades que se pueden desarrollar se ven afectadas por esta denominación.

El caso del embalse de Muña es un caso especial y atípico debido a la contaminación por aguas negras que están presentes en este embalse, sin embargo, a su vez es una gran oportunidad para poder cubrir una gran cantidad de la superficie del embalse dado que no es un atractivo turístico muy llamativo debido a esta contaminación, a su vez este proyecto puede dar energía a los diversos instrumentos de medición y control en el embalse para poder seguir de cerca la situación del mismo, detectar cualquier cambio y poder poner en marcha planes de recuperación con información en tiempo real.

Como características generales de los embalses estos sirven como atractivo turístico para el municipio y el área el cual tiene cercanía. La mayoría de estos tienen actividades turísticas asociadas con el avistamiento de flora y fauna a través de caminatas, cabalgatas, y otros medios de transporte, directamente en el cuerpo de agua usando lanchas, canoas, ferris o planchones, también tienen sitios para acampar o cabañas. Además de estas actividades también se puede ver un patrón entre los embalses ubicados en climas “fríos” y “calientes”, los climas fríos tienden a tener menos deportes acuáticos y se concentran en tener actividades que rondan más en conocer la flora y la fauna del área y también poder descansar, entre estos embalses podemos ubicar algunos como Chuza, Neusa, Sisga, entre otros. En cambio, en climas “calientes” se tienden a ver una mayor cantidad de actividades relacionadas con deportes acuáticos como kayak, Jet ski, Windsurf, Kitesurf, entre otros.

También los embalses se generan como respuesta a diferentes necesidades como generación de energía eléctrica, represas para acumulación de agua potable para el consumo de la población o represas con la intención de dotar de agua para distritos de riego.

La información anteriormente mencionada se sustrajo de una investigación por internet acerca de las ofertas turísticas relacionadas con cada embalse, se compilo esta información en una matriz y se obtuvieron las actividades más frecuentemente ofertadas para los embalses, tanto para embalses ubicados en climas fríos como para climas cálidos, también se usó el documento de (Barón Cáceres, 2019) en donde se describe la intención del embalse.

Costos

Los costos que se deben contemplar se deberían sacar tomando un estimado de USD\$/Wp, básicamente cuanto puede valer cada componente (USD\$ dólares estadounidenses) medido en bases la cantidad de kW que se desee instalar. Al año 2018 se tiene una estructura de costos que permite dar una aproximación bastante pertinente, esta aproximación se debe combinar con la legislación actual nacional la cual de exenciones a ciertos componentes de los proyectos solares.

Como se mostró anteriormente en la línea de tiempo, en realidad los proyectos flotantes solares no se empezaron a desarrollar más intensivamente sino hasta el año 2017. De acuerdo a un análisis hecho por (World Bank Group et al., 2019b, p. 93), en donde se tomaron varios proyectos alrededor del mundo, se segmentaron por años y se les saco el costo de USD\$/Wp se puede visualizar una clara baja en costos en el año 2018 con respecto a todos los años anteriores, en donde el costo menor ronda los \$0.83/Wp y el costo mayor es de \$1.14/Wp. Tomando este mismo documento como referencia podemos notar 2 afirmaciones que nos ayudan a tener un mejor entendimiento de la situación: i) la variación en el costo depende bastante de la ubicación, la profundidad y variación del cuerpo de agua, y el tamaño del proyecto que se desea ubicar; ii) en cuanto a los costos la escala del proyecto importa para proyectos hasta los 30 MWp, después de esta cifra los costos por economías de escala se vuelven menos significativos.

Para el primer punto descrito en el anterior párrafo el IDEAM define las batimetrías como: “levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, sea este el fondo del mar o el fondo de los lechos de los ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, etc. es decir, la cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua.” Las batimetrías desarrolladas en Colombia de cuerpos lenticos hasta la fecha de este estudio son 2: en octubre de 2014 “Hidrología Batimetría Ciénaga de Zapatosa” y en Abril de 2020 “Informe levantamiento topográfico y de batimetría del lago de Tota”.

Es necesario resaltar que los proyectos FPV están aún en una etapa temprana, si se les compara con los tradicionales proyectos solares. Al año 2018 los proyecto FPV tenían una capacidad acumulada instalada de alrededor de 1.5 GWp, sin embargo, en ese mismo año los proyectos PV en tierra tenían alrededor de 500 GWp, la diferencia es considerable y demuestra que aún hay un gran camino para desarrollar proyectos FPV. Las cifras anteriores también muestran que aún no se puede decir con certeza que el costo de un proyecto FPV sea una cifra en específico, solo se puede trabajar con los costos que se han hecho públicos. Es importante también subrayar que China tiene la mayoría de los proyectos PFV desarrollados en el mundo de más de 15 MWp instalados.

Para lograr obtener datos más precisos es necesario hacer todo el ejercicio desde el comienzo, teniendo en cuenta no solo los costos de los componentes de fábrica, sino también los costos que vienen asociados a su importación y logística. También es necesario mirar que componentes están exentos de IVA y de arancel, de acuerdo con los tratados de comercio que tiene Colombia y la normatividad interna para fomentar el desarrollo de las energías limpias no convencionales.

El documento (World Bank Group et al., 2019b) nos da un punto de partida para tomar los costos de un proyecto FPV de 50 MWp con un nivel de profundidad en el cuerpo de agua de máximo 10 metros y una variación mínima en el nivel del agua:

Componente	Costo USD\$/Wp
Módulo Panel solar Módulo de silicio policristalino	0.25
Inversor Inversor Central	0.06
Estructura Flotante, anclaje y sistema de amarre Consideraciones necesarias (Flotadores HDPE): <ul style="list-style-type: none"> • Batimetría (9 metros profundidad) • Variación de nivel de agua • Características del aire y de las olas • Tipos de orilla para el despliegue 	0.15

• Calidad del agua y nivel de salinidad	
Componentes del sistema: Cableado, Combiner box, caja de circuitos, transformadores, entre otros.	0.13
Diseño, instalación, trabajos civiles, pruebas y costos de comisión. - Un equipo de 50 instaladores entrenados puede montar entre 500 kWp y 1 MWp.	0.14
Costos de interconexión a la red	Se asume que no hay costos de interconexión.

Incentivos de Fuentes No Convencionales de Energía

(Ley 1715 de 2014, modificada por la Ley 2099 de 2021)

NOMBRE DEL INCENTIVO	DESCRIPCIÓN	MARCO NORMATIVO
Exclusión del impuesto a las ventas - IVA en la adquisición de bienes y servicios para el desarrollo de proyectos de generación con FNCE y gestión eficiente de energía	Para fomentar el uso de la energía procedente de fuentes no convencionales de energía - FNCE y la gestión eficiente de energía, los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la preinversión e inversión, para la producción y utilización de energía a partir de las fuentes no convencionales, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos, y para adelantar las acciones y medidas de gestión eficiente de la energía, incluyendo los equipos de medición inteligente, que se encuentren en el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales - PROURE estarán excluidos del I VA	Artículo 12 Ley 1715 de 2014 Artículo 9 de la Ley 2099 de 2021 Decreto 2143 de 2015 Resolución 1283 de 2016
Deducción de renta a la producción de energía con FNCE y gestión eficiente de la energía	Como fomento a la investigación, el desarrollo y la inversión en el ámbito de la producción de energía con fuentes no convencionales de energía -FNCE y de la gestión eficiente de la energía, incluyendo la medición inteligente, los obligados a declarar renta que realicen directamente inversiones en este sentido, tendrán derecho a deducir de su renta, en un período no mayor de 15 años, contados a partir del año gravable siguiente en el que haya entrado en operación la inversión, el 50% del total de la inversión realizada.	Artículo 11 Ley 1715 de 2014 Artículo 8 de la Ley 2099 de 2021 Artículo 174 de la Ley 1955 de 2019 Decreto 2143 de 2015 Resolución 1283 de 2016
Exención del pago de Derechos Arancelarios FNCE y medición y evaluación de los potenciales recursos o acciones y medidas	Las personas naturales o jurídicas que, a partir de la vigencia de la presente ley, sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos e fuentes no convencionales de energía -FNCE y medición y evaluación de los potenciales recursos o acciones y medidas de eficiencia energética, incluyendo los equipos de medición inteligente, en el marco del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No	Artículo 13 Ley 1715 de 2014 Artículo 10 de la Ley 2099 de 2021 Decreto 2143 de 2015 Resolución 1283 de 2016

de eficiencia energética	Convencionales -PROURE, gozarán de exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de preinversión y de inversión en dichos proyectos, Este beneficio arancelario será aplicable y recaerá sobre maquinaria, equipos, materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de los mismos.	
Depreciación acelerada de activos FNCE y gestión eficiente de energía	La depreciación acelerada en la generación a través de FNCE será aplicable a las maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la preinversión, inversión y operación de la generación con FNCE, así como para medición y evaluación de los potenciales recursos y para acciones o medidas de gestión eficiente de energía, incluyendo los equipos de medición inteligente, que sean adquiridos y/o construidos, exclusivamente para estos fines.	Artículo 14 Ley 1715 de 2014 Artículo 11 de la Ley 2099 de 2021 Decreto 2143 de 2015 Resolución 1283 de 2016

Ilustración 7 Incentivos de Fuentes No Convencionales de Energía.

Fuente: Prof. Carlos Enrique Díaz Reyes, Clase magistral de Economía Ambiental y valoración de costos ambientales. Maestría de Derecho y Gestión Ambiental, Universidad del Rosario. 2022

Tomando en cuenta los datos mencionados en el cuadro anterior, con su respectiva reglamentación, podemos destacar cuatro incentivos:

- Exclusión de IVA para ciertos bienes y servicios. Tomar en cuenta cuales son los bienes y servicios y sus respectivos códigos tarifarios. Etapa de pre-inversión y construcción
- Deducción de Renta. Fase de Operación, hasta 15 años y no deducir más del 50% de la renta que se debe tributar.
- Exención de aranceles. Para insumos que no se puedan conseguir nacionalmente.
- Depreciación acelerada. Este medio para depreciar los activos impacta directamente el valor que la empresa, que hace la inversión, debe pagar en renta; que se deriva del Estado de Resultados. Tasa anual de depreciación será no mayor a 33.33%

PROYECTOS Y SISTEMAS SOLAR FOTOVOLTAICOS		
SERVICIO	ETAPA	CONDICIONAL O COMENTARIO
Diseño de ingeniería del sistema, incluyendo software especializado	Preinversión e Inversión	Si lo realiza una persona jurídica (Certificación de experiencia a través de actas de recibo a satisfacción, contratos, etc.). Si lo realiza un profesional (Experiencia labora, tarjeta profesional, etc.)
Estudios de valoración de potencial	Preinversión	
Estudio de pre-factibilidad	Preinversión	
Estudio de factibilidad	Inversión	

Preparación / adaptación del terreno para instalación del sistema	Inversión	
Servicios de topografía	Preinversión e Inversión	
Estudios estructurales	Preinversión e Inversión	Para estructuras en techos
Estudios ambientales	Preinversión e Inversión	Diagnósticos ambientales de alternativas y estudios de impacto ambiental. Estudios especializados (únicamente estudios, no la implementación del DAA o EIA)
Estudios de conexión.	Preinversión e Inversión	No incluye costos asociados con contratos de conexión.
Asesoría y consultoría especializada	Preinversión e Inversión	Técnica, legal, financiera, contable, estudios de suelos, estudios de mercadeo, topografía, estudios geotécnicos.
Arrendamiento de equipos LIDAR	Preinversión	
Instalación y puesta en operación del sistema	Inversión	Si lo realiza una persona jurídica (Certificación de experiencia a través de actas de recibo a satisfacción, contratos, etc.). Si lo realiza un profesional (Experiencia labora, tarjeta profesional, etc.)
Fletes, transporte y requerimientos asociados al traslado de componentes al sitio de instalación	Preinversión e Inversión	Nacional e internacional
Obras civiles y estructurales para el montaje del sistema.	Inversión	
Obras civiles y estructurales para efectos de medición del recurso solar	Inversión	
Certificación RETIE	Inversión	

Ilustración 8 Listado de servicios excluidos del IVA y Exentos de gravamen arancelario.

Fuente: UPME. Obtenido de:

https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/AnexoI_Listado_Bienes_Servicios.xlsx

Supuestos para el desarrollo de proyecto

En esta sección se toman 2 supuestos para la realización de este trabajo:

1. En un área de 1 hectárea se puede instalar 1 MW de energía solar.
2. El porcentaje de área a cubrir no debe exceder un área mayor al 30% del embalse.

Para el primer supuesto se tomaron dos fuentes de información distintas. Para la primera fuente de información se realizó una búsqueda de información que tuvieran dos datos en particular: i) Número de Megavatios (MW) instalados y ii) cantidad de superficie cubierta al implementar el proyecto. Se tuvo en cuenta que los proyectos que se evaluarán tuvieran una capacidad instalada mayor a 5 MW.

Revisando los proyectos realizados bajo los criterios nombrados anteriormente se pudieron obtener 4 proyectos en particular. El primer proyecto ubicado en el Londres, Reino Unido, en el reservorio

“Queen Elizabeth II” con una capacidad instalada de 6.3 MW y abarcando un área de aproximadamente 5.7 hectáreas, la empresa a cargo de desarrollar este proyecto fue “Lightsourcebp” (Lightsourcebp, 2016). El segundo proyecto ubicado en Tainan, Taiwan, en la represa hidroeléctrica Wushantou con una capacidad instalada de 13.7 MW y un área de aproximadamente 13 hectáreas, la empresa desarrolladora de este proyecto fue “Scotra Co. Ltd.” (PI Power Insider, 2021). El tercer proyecto evaluado se encuentra en la prefectura de Chiba, Japón, en la represa reservorio Yamakura con una capacidad instalada de 13.7 MW y un área de 18 hectáreas, su desarrollador fue “Kyocera TCL Solar LLC” (Culley, 2016). Y el último proyecto, y el más grande evaluado, se da ubica en Singapur, en el reservorio Tengeh, con una capacidad instalada de 60 MW y un área aproximada de 45 hectáreas, inaugurada oficialmente el 14 de julio de 2021 siendo su desarrollador la empresa “Sembcorp Floating Solar Singapore”, empresa subsidiaria de Sembcorp Industries (Sembcorp Industries, 2021).

Además de las anteriores referencias se tomó en consideración el supuesto planteado en el trabajo “Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility” en el cual tomaba un ratio de 0.5MW por cada hectárea para poder evaluar su modelo propuesto usando diferentes escenarios que cada vez iban cubriendo más área del cuerpo de agua, para lograr un punto óptimo y desarrollar un proyecto FPV en el reservorio Rapel en una planta hidroeléctrica en Chile en específico.

Lo cierto es que esta proporción puede variar grandemente dado que hay varios factores en consideración como la efectividad del panel solar, el espacio que se quiere dejar entre los paneles solares para lograr mayor o menor ventilación del sistema, las filas de paneles solares que se dejan entre los pasajes para realizar el mantenimiento, entre otros.

Para el segundo supuesto se tomó como primer punto de referencia el documento mencionado anteriormente de (Haas et al., 2020) en donde los autores desarrollaron un modelo en el cual uno de sus objetivos era encontrar el impacto que se podría llegar a realizar al desarrollar un proyecto FPV en un reservorio de una hidroeléctrica en dos aspectos: i) el desarrollo de algas, que impacta la calidad del agua, y ii) las ganancias para la hidroeléctrica al implementar este sistema.

Las conclusiones derivadas de este documento con respecto a estos puntos se mostraron de la siguiente manera: para el reservorio en cuestión, el punto de rango óptimo a cubrir para manejar efectivamente el crecimiento de algas es de alrededor de 40% al 60% del área del reservorio, además, con respecto a las ganancias para la hidroeléctrica se dice que no es recomendable cubrir más del 30% del reservorio, dado que con este porcentaje se cubre la capacidad de generación actual de la hidroeléctrica, no se necesita incurrir en sobre costos para modernizar el sistema y no hay pérdidas de ganancias, bajo el supuesto de 0.5 MW por hectárea.

Paneles Solares Flotantes Vs Granja Solar Convencional en tierra, ejemplo Calima.

Para poner en práctica y en contexto las anteriores ventajas de un sistema solar flotante con respecto a un sistema solar en tierra, o convencional, en Colombia debemos tomar diferentes locaciones, observar experiencias anteriores y poder sacar hipótesis del comportamiento de un sistema de estos a gran escala y su comportamiento con los beneficios que se mostraron en la anterior sección.

Tomando el ejercicio de campo hecho por (Pincay Lozada, 2017) con dos paneles solares policristalino y su temperatura de operación de día 18 de Junio de 2014 en la ciudad de Cali, el panel mostro una temperatura de operación de 62°C al cabo de 2 horas de funcionamiento. Tomando los datos que se mencionaron anteriormente es bueno considerar que los fabricantes de paneles solares entregan los datos de generación de energía a condiciones de temperatura de operación de 25°C y por cada grado demás que esté funcionando el panel hay una perdida termal de 0.45%, de acuerdo al IDEAM la distribución de la temperatura media anual (°C) Promedio Multianual 1981 – 2010 para la ciudad de Cali se sitúa entre 24° y 26°, consultando en el Global Solar Atlas los datos para esta ubicación podemos hallar lo siguiente: temperatura del aire de 21°C, elevación del terreno de 951m, Radiación Horizontal Global de 1997 kWh/m², ahora bien, siguiendo esta línea de razonamiento y tomando el embalse geográficamente más cercano a esta ubicación que sería el embalse Calima de en departamento del Valle vemos que tiene condiciones similares: temperatura del aire de 20.7°C, elevación del terreno de 1440m, Radiación Horizontal Global de 1801 kWh/m². Si asumimos que la temperatura de operación de un panel solar ubicado en esta locación esta a la misma temperatura que en el ejemplo de Cali, aproximadamente unos 60°C, podemos ver que para un sistema solar ubicado en tierra las perdidas termales rodarían un 15.8%, de acuerdo con los datos proporcionado en el estudio de (Cazzaniga et al., 2018).

Teniendo en cuenta que el embalse Calima tiene un área de aproximadamente 1000 hectáreas y que no se debe superar el 30% de la cobertura del espejo de agua, dado el supuesto auto impuesto anteriormente, vamos a hacer una modelación de una cobertura de un 20% de la superficie, aproximadamente de 200 hectáreas. Teniendo en cuenta que bajo el supuesto de que en 1 hectárea se podría llegar a instalar 1 MW en energía solar fotovoltaica, podemos llegar a instalar 200 MW de energía. Ahora bien, en esta ubicación tenemos una generación de energía fotovoltaica anual con un sistema convencional ubicado en tierra de aproximadamente 1.45 GWh anual, con una instalación de 1000 kWp o 1 MWp, esto en energía generada en esta ubicación de acuerdo con los datos del Global Solar Atlas, si asumimos que instalaríamos 200 MW tenemos una generación anual de energía de 298.8 GWh anual, y contando las perdidas termales del panel de un 15.8% estamos disminuyendo esta generación a 251.6 GWh anual, dejando de generar unos 47.2 GWh anuales.

En contraste con una generación flotante fotovoltaica podemos generar sin ningún sistema externo un 10% más comparado con el sistema anteriormente evaluado en tierra, dado el efecto de enfriamiento debido a la evaporación natural del agua en el embalse y un indicador GHI mayor a 1600 kWh/m²/año, lo cual supondría pasar de generar 251.6 GWh anual a unos 276.7 GWh anual, aumentando la generación anual en 25.2 GWh. Ahora bien, esta generación se puede mejorar si se instala alguno de los sistemas mencionados anteriormente como podría ser un velo de agua, rociadores, o aumentar el espaciado entre paneles para tener una mejor ventilación de estos y menor temperatura de operación, alcanzando la generación de energía fotovoltaica sin incurrir en perdidas termales. En este caso el objetivo sería que el panel trabajara por debajo de una temperatura de operación de 25°C.

Si tomáramos como punto de referencia la temperatura de aire y la distribución de la temperatura media anual (°C) promedio multianual de 1981 a 2010 del IDEAM y con ello suponemos la temperatura esperada de operación de los paneles solares en cada lugar podemos tener una idea de las perdidas térmicas de los paneles y un ajuste mayor de la generación energética en GWh anual de un sistema solar fotovoltaico en tierra y flotantes, es importante aclarar que la temperatura del panel depende de muchas variables que no se van a tomar en cuenta en este trabajo como: la velocidad del

aire, la radiación, el entorno de la ubicación, puntos calientes, tiempo de desconexión, entre otras variables.

Vamos a tomar como punto de referencia los datos para cada embalse de producción de energía fotovoltaica específica tomadas del Global Solar Atlas y con base a estos factores vamos a suponer 3 rangos de pérdidas térmicas de 10%, 15% y 20%, y también se asume que en se cubrirá 20% de la superficie del embalse.

Con base a estos supuestos tenemos 3 distintos resultados, 1 por cada escenario modelado. En el primer escenario vemos que con pérdidas térmicas de 10% y con el 20% de la superficie de todos los embalses cubiertos por paneles solares y asumiendo que esta superficie es tierra y no agua vemos que el resultado es de 23,387 GWh año. En el segundo escenario con un 15% de pérdidas este resultado se reduce a 22,088 GWh año. Y, en el tercer escenario con un 20% obtenemos un resultado de 20,788 GWh año. Es importante resaltar que se tomo el mismo factor de pérdidas para cada escenario independientemente de su ubicación y no se tomo en cuenta el grado de inclinación recomendado por Global Solar Atlas para ninguno de los embalses. Los resultados más detallados de este modelamiento se pueden ver en la Ilustración 9 a continuación.

N°	Nombre	Departamento	Área (ha)	Total photovoltaic power output GWh year per 1 MWp2	20% area a cubrir	Escenario 1 - 10% Perdidas. Total photovoltaic power output GWh year	Escenario 2 - 15% Perdidas. Total photovoltaic power output GWh year	Escenario 3 - 20% Perdidas. Total photovoltaic power output GWh year
8	Guajaro	Atlántico	16.000	1,62	3200	4.651	4.393	4.134
21	Guavio	Cundinamarca	15.000	1,39	3000	3.744	3.536	3.328
25	Urra I	Córdoba	7.400	1,45	1480	1.933	1.826	1.719
1	Betania	Huila	7.000	1,51	1400	1.908	1.802	1.696
22	Sogamoso	Santander	7.000	1,46	1400	1.843	1.741	1.638
2	Peñol	Antioquia	6.240	1,65	1248	1.850	1.747	1.644
6	Tomine	Cundinamarca	3.778	1,47	755,6	998	942	887
16	Playas	Antioquia	3.200	1,58	640	908	858	807
27	Rio Rancheria	La Guajira	2.480	1,69	496	756	714	672
4	Salvajina	Cauca	2.031	1,58	406,2	578	546	514
7	Calima	Valle	1.934	1,45	386,8	506	478	450
14	Arroyo Matuya	Bolivar	1.400	1,50	280	378	357	336
5	Chivor	Boyaca	1.300	1,41	260	331	312	294
3	Prado	Tolima	1.254	1,48	250,8	333	315	296
13	Arroyo Grande	Bolivar	1.240	1,51	248	338	319	300
24	Miel I	Caldas	1.220	1,55	244	341	322	303
9	Jaguas (San Lorenzo)	Antioquia	1.060	1,59	212	303	286	269
12	Neusa	Cundinamarca	955	1,34	191	231	218	205
18	Muña	Cundinamarca	933	1,24	186,6	209	197	186
11	Miraflores	Antioquia	815	1,54	163	226	214	201
28	La Copa	Boyaca	770	1,53	154	213	201	189
15	Sisga	Cundinamarca	700	1,40	140	177	167	157
10	Chuza	Cundinamarca	537	1,21	107,4	117	110	104
19	Troneras	Antioquia	465	1,62	93	136	128	121
23	Porce III	Antioquia	461	1,43	92,2	118	112	105
26	San Rafael	Cundinamarca	371	1,42	74,2	95	90	84
17	Punchina	Antioquia	340	1,54	68	94	89	84
20	San Silvestre	Santander	250	1,58	50	71	67	63

Ilustración 9 Tabla de datos del modelamiento de 3 escenarios de pérdidas
Fuente: Elaboración propia tomando datos de Global Solar Atlas

Ahora bien, al simular el potencial de generación con un sistema solar flotante y usar el dato proporcionado por World Bank Group acerca de “las granjas solares con un indicador mayor a 1600 cuando el indicador de “Global Horizontal Irradiation” o GHI es mayor a 1600 kWh/m2/año las

ganancias de generación de los sistemas FPV son de alrededor de 10% mayor comparadas con la misma generación en el mismo sitio con sistemas solares puestos en tierra”, como se mencionó anteriormente y suponiendo que los 2 embalses Chuza con un índice GHI de 1435 y Muña con un índice GHI de 1524 que no alcanzan ese índice de GHI van a ser tomados como tal, en otras palabras no se benefician de estas ganancias de generación, se pueden ver los siguientes resultados: en el primer escenario se alcanzaría una generación como si no hubieran pérdidas térmicas, en otras palabras se generarían 25,949 GWh año, en el segundo escenario se generarían 24,650 GWh año, y en el tercer escenario este resultado de generación sería de 23,351 GWh año.

Al comparar estos datos con los resultados obtenidos en la simulación hecha en los sistemas en tierra podemos ver que en los sistemas flotantes se generaría más energía, aproximadamente 2,562 GWh año, esta cifra sería constante a través de los 3 escenarios dado que se añadirán un 10% de generación con los sistemas flotantes, a parte de los 2 embalses que no cumplen con el índice GHI requerido. Es importante aclarar que estos resultados no muestran sistemas auxiliares como el velo de agua o los rociadores para aumentar la reducción de pérdidas térmicas por cuenta de la temperatura de operación del panel, en otras palabras cuando simulamos el tercer escenario con un 20% de pérdidas térmicas aún con el sistema flotante los paneles funcionarían con un 10% de pérdidas térmicas dado que el panel no alcanzaría la temperatura establecida de 25°C que establece el fabricante para garantizar su óptima generación de energía en su hoja técnica de producto. Si los sistemas auxiliares se adecuaban a las granjas solares flotantes se podrían alcanzar la temperatura de 25°C y se podrían lograr aún una temperatura aún más baja y los paneles podrían trabajar aún más efectivamente.

Normativa para poder adquirir la autorización ambiental para ejecutar el proyecto

Primero es necesario saber en qué parte de la legislación está ubicada las aguas en las cuales se van a localizar estos proyectos. En el caso que compete a este documento se va a utilizar el término de “aguas continentales superficiales” siguiendo los términos usados en la normativa actual, de acuerdo con el código de recursos naturales.

Ahora bien, las autorizaciones ambientales necesarias para desarrollar un proyecto de esta índole en aguas públicas, de acuerdo con el decreto 1076 de 2015 artículo 2.2.3.2.7.1, dicta que “Toda persona natural o jurídica, pública o privada, requiere concesión para obtener el derecho al aprovechamiento de las aguas para los siguientes fines: (...) d. Uso industrial; e. Generación térmica o nuclear de electricidad; (...) p. Otros usos similares.” Sin embargo, es importante resaltar que este artículo no dicta explícitamente la generación de energía a través de las tecnologías FNCER o mediante el uso de la superficie de agua.

De acuerdo con el decreto 1076 de 2015 en su artículo 2.2.3.2.5.3. “Toda persona natural o jurídica, pública o privada, requiere concesión o permiso de la Autoridad Ambiental competente para hacer uso de las aguas públicas o sus cauces, salvo en los casos previstos en los artículos 2.2.3.2.6.1 y 2.2.3.2.6.2 de este Decreto”. Recordemos que en el caso de proyectos FPV el recurso hídrico se va a usar como superficie para el montaje del proyecto, sin hacer derivaciones del caudal; a menos que se quiera usar un sistema de riego para maximizar el efecto de enfriamiento de los paneles solares, caso en el cual se hace *uso del caudal*, pero no se hace derivación alguna.

La periodicidad por las cuales se dan el permiso de concesión de aguas, según el artículo 2.2.3.2.7.4 del decreto mencionado anteriormente, es establecido “por un término no mayor de diez (10) años, salvo las destinadas a la prestación de servicios públicos o a la construcción de obras de interés público o social, que podrán ser otorgadas por períodos hasta de cincuenta (50) años.” Los proyectos FPV son obras de utilidad pública e interés social dado que el artículo 16 de la Ley 56 de 1981 declaró de utilidad pública e interés social los planes, proyectos y ejecución de obras, entre otros, para la generación, distribución y transmisión de energía eléctrica.

Se debe tener en cuenta que es necesario hacer el requerimiento ante la autoridad correspondiente, la cual va a variar dependiendo de la capacidad a instalar y la ubicación de la obra que se vaya a ejecutar, con esto se quiere decir que de acuerdo con el artículo 2.2.2.3.2.3. serán las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos y las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002 cuando la capacidad a instalar sea igual o mayor a diez (10) MW y menor de cien (100) MW, de acuerdo con el numeral 4 del mencionado artículo. Cuando la capacidad a instalar es superior o igual cien (100) MW se deberá solicitar la licencia ambiental ante la ANLA de acuerdo con el artículo 2.2.2.3.2.2. numeral 4.

¿Permiso o Licencia ambiental para un proyecto FPV en embalses?

Retomando lo dicho anteriormente podemos resumir este punto entre la autoridad correspondiente y la capacidad a instalar en MW del proyecto en los siguientes puntos:

- Para proyectos de capacidad instalada menores a 10 MW es necesario solicitar un permiso de Ocupación de cauce ante la Corporación Autónoma Regional o la autoridad ambiental correspondiente de acuerdo con la ubicación del proyecto.
 - De acuerdo al proyecto desarrollado en el embalse de Urra por “Empresa Urra S.A. E.S.P.” se recibió respuesta de la siguiente manera: “De acuerdo a la normatividad ambiental vigente, los proyectos fotovoltaicos que generan menos de 10 MW no están sujetos a licenciamiento ambiental, pero si deben cumplir la normatividad ambiental relacionada con la demanda de recursos naturales, por lo que nuestro proyecto Aquasol, que es de paneles solares flotantes, solicitó y obtuvo permiso de ocupación de cauce del espejo de agua del embalse URRÁ”.
- Para proyectos con una capacidad instalada igual o mayor de 10 MW y menor de 100 MW es necesario solicitar la licencia ambiental ante la Corporación Ambiental Regional o la autoridad ambiental correspondiente de acuerdo con la ubicación del proyecto.
- Para proyectos con una capacidad igual o superior de 100 MW es necesario solicitar la licencia ambiental ante la Autoridad de Licencias Ambientales ANLA.

En la resolución de la ANLA número 324 del 2015 se describen los costos de la obtención y seguimiento de la licencia, acompañado por otros costos que puedan emerger como cambios menores, entre otros.

La fórmula que utilizan es la siguiente:

$$V.T.S. = (\text{Honorarios} \times \text{Dedicación Hombre-Mes}) + (\text{Total viáticos} + \text{Gastos Admón.} + \text{Tiquetes aéreos}).$$

Donde V.T.S. se refiere a el Valor Total del Servicio. El valor total del servicio va a cambiar dependiendo de que tipo de licencia se quiera acceder y otros permisos y servicios que se van a realizar para esta licencia. Por ejemplo, para “Proyectos, obras o actividades del Sector Eléctrico – Evaluación y Seguimiento” nos referimos a la tabla número 3, en el anexo único de la resolución, en donde se muestran las estructuras de cobro.

Con respecto al Diagnostico Ambiental de Alternativas (DAA) que es un proceso que se requiere presentar al momento de requerir la licencia ambiental, de acuerdo con el decreto 2462 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se modifica el numeral 7 del artículo 2.2.2.3.4.2 del decreto 1076 de 2015, el cual antes de este decreto incluía a todas las fuentes de energía alternativa virtualmente contaminantes, ahora distingue entre las que dependen integralmente de su ubicación para generar energía y las que no, con esta distinción ahora no es necesario realizar el DAA y las autoridades no deberían de requerir que se surta el DAA para los proyectos cuya fuente de abastecimiento es solar, eólica, geotermia y mareomotriz.

Al requerir un concepto de la CAR Cundinamarca con respecto al desarrollo de proyectos FPV menores a 10 MW la entidad hace referencia a que la construcción de embalses está ligada a una licencia ambiental con la autoridad competente de acuerdo a su capacidad, siendo así “el proyecto planteado de localizar una serie de fotoceldas voltaicas sobre la superficie de un embalse será objeto de licenciamiento ambiental o de modificación de la referida licencia, en caso de que el embalse ya exista y haya surtido dicho trámite” de acuerdo con los numerales 2.2.2.3.2.2 y 2.2.2.3.2.3 del decreto 1076 del 2015. Además, agregan “en caso de que la propuesta se genere sobre embalses existentes, y que estos ya cuentan con instrumento ambiental vigente, llámese licencia ambiental o plan de manejo ambiental, se deberá surtir todo el trámite técnico, legal y administrativo que estipula la normatividad para la modificación del instrumento ambiental.”

Cuando se hace la consulta acerca de qué permisos son necesarios para un cuerpo de agua lenticos que no sea un embalse, como un lago o laguna, la respuesta de la entidad está orientada al uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, de acuerdo con la resolución 157 de 2004 del Ministerio de Ambiente, y la Convención Ramsar. Más adelante, la entidad hace referencia a la resolución 196 del 2006 por la cual se adopta la guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales en Colombia, la entidad da la recomendación de usar esta guía como soporte y que el proyecto “haría parte de un instrumento ambiental mayor, donde se incluirían las autorizaciones de ocupación de cauce respectivas” en la que se alude a un licenciamiento ambiental y a un plan de manejo ambiental “con que deben contar los humedales priorizados por las autoridades (que pueden incluir lagos y lagunas)”.

Como se puede vislumbrar por las anteriores respuestas que la CAR Cundinamarca ha brindado se puede vislumbrar que no se tiene un conocimiento claro en torno a cuál es el permiso indicado para construcciones FPV menores a 10 MW. Por lo anterior se decidió contactar directamente a los proyectos que se han desarrollado en Colombia para saber que licencia ambiental ellos tramitaron, en este caso a los 2 proyectos en Colombia: EPM en Antioquia en el embalse El Peñol y Empresa Urrea S.A. E.S.P. con su proyecto Aquasol ubicado en el embalse de Urrea. Aquasol confirmó que ellos solicitaron y obtuvieron un permiso **Ocupación de Cauce**, por parte de la entidad ambiental. Con respecto a EPM no se recibió ninguna respuesta.

De acuerdo con la respuesta recibida por la CAR Cundinamarca con respecto al desarrollo de proyectos FPV, en cuerpos lenticos diferentes a embalses, se aprecia que aún falta un desarrollo acerca de cómo abordar estos proyectos y cuál es el instrumento necesario para aplicar en este caso.

¿Qué impactos ambientales generan los proyectos FPV?

Independientemente de que se requiera o no realizar el trámite de licencia ambiental se debería conocer los impactos (o posibles impactos) se causaran como consecuencia de instalar proyectos FPV en un cuerpo de agua lenticos. En esta sección se darán las pautas de los posibles impactos que se deben considerar al adelantar estos proyectos.

La realidad es que aún hay bastante desconocimiento acerca de los impactos ambientales que se puedan generar, dado que su ubicación son superficies de agua y las experiencias documentadas son limitadas y bastante recientes. Sin embargo, se han adelantado varias bases teóricas para poder vislumbrar los posibles impactos que podría haber en ciertos aspectos puntuales y este punto se va a desarrollar en base a dos documentos en específicos que aborda estos temas; el primer documento es *Where Sun Meets Water – Floating Solar Handbook*; el segundo documento ubicado es el Banco de Desarrollo Asiático (ADB).

“Dado la novedad de los proyectos FPV los diferentes actores interesados en el desarrollo de estos proyectos están surgiendo dudas en torno a los impactos que puedan tener en la calidad del agua dado que estos impactan directamente la salud de la población y la calidad del ecosistema acuático”(World Bank Group et al., 2019a, p. 86).

Entre las estrategias propuestas en ese mismo documento para mitigar estas preocupaciones están: i) limitar la proporción de la superficie que cubre el proyecto FPV y ii) separar el proyecto FPV en diferentes parches o islas, separadas unas de otras con el objetivo de reducir el impacto ambiental. Se hace la salvedad, sin embargo, que estrategias para ayudar con ciertos problemas pueden ocasionar otros problemas y que cada caso se debe mirar por separado considerando su ubicación.

En el documento compilado por el Banco de Desarrollo Asiático (ADB) bajo el nombre “Reporte inicial de la examinación ambiental y social” se mencionan las diferentes consideraciones para desarrollar una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para la instalación de un proyecto FPV de 47.5 MW en la represa del proyecto hidroeléctrico Da Mi en la provincia de Binh Thuan, Vietnam. También, se realizó un “due diligence” por parte de un tercero dado que el proyecto solicitó financiación del ADB y consideran que sus estándares de evaluación ambiental y social son más rigurosos que los del gobierno vietnamita.

Entre las características principales del proyecto se encuentran el uso de 51.5 hectáreas (ha), entre las que se encuentran 5.8 ha para las líneas de transmisión, la adquisición de tierras resultara en el desplazamiento económico de 42 hogares. Para este proyecto se espera que la construcción de infraestructuras auxiliares dure un año, y el ciclo de vida del proyecto sea de 20 años.

Se estima que entre los impactos ambientales y sociales que se pueden generar del proyecto podrían estar los siguientes, separados por fases: i) Fase de construcción – preparación de sitio, instalación y contratación de infraestructura (como paneles, transformadores, inversores, carreteras de acceso y líneas de transmisión). Se espera que de esta primera fase se genere emisiones de ruido y atmosféricas, aunque por un corto tiempo (1 año). ii) Fase de Operación – Mantenimiento continuo a la infraestructura, el cual incluye principalmente el cuidado de los paneles solares al remover continuamente polvo o cualquier tipo de contaminación que pueda reducir su desempeño.

En los documentos consultados hay un punto común del cual se habla y el cual esta relacionado con los niveles de oxígeno en el agua y la disminución en temperatura, ambos factores causados por las sombras que los paneles solares dan en la superficie de agua. Estos 2 factores pueden ser tanto beneficios como contraproducentes dependiendo del ecosistema o los problemas que actualmente afectan al banco de agua en el cual se van a ubicar los paneles solares. Como lo evidencian (Haas et al., 2020) en su documento:

“Cuando la radiación solar que penetra el agua es substancialmente reducida, debido al cubrimiento de la mayoría de la superficie por paneles solares, el ecosistema en el agua puede verse negativamente afectado. Esto es a pesar del impacto positivo debido a la reducción de algas. La temperatura del agua también se desviará de los niveles naturales, lo cual es causado por cubrir la superficie del agua con paneles y flotadores.”

También, es necesario tener en cuentas que la sombra generada de los paneles puede ser un factor que ayude a las comunidades donde las necesidades relacionadas con el uso del agua son una dificultad. Es necesario recordar que el efecto de los paneles encima de la superficie del agua disminuye su evaporación natural en el cuerpo de agua, lo que conlleva a una mayor cantidad de agua disponible para su uso, como lo mencionan en su documento (Pouran et al., 2022):

“En un estudio de (Padilha Campos Lopes et al., 2020) acerca de las regiones de Brasil con climas semiáridos mostro que, cubriendo las superficies en un 20%, 50% y 70% podemos esperar un 15.3%, 37% y 55.2% de reducción en la evaporación de agua de los reservorios.”

Sugerencias para realizar modificaciones, variaciones, inclusiones y otros cambios considerados a los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA en proyectos de uso de energía solar fotovoltaica.

Realizando una revisión de los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA en proyectos de uso de energía solar fotovoltaica para poder saber si los proyectos FPV pueden enmarcarse en estos términos de referencia se encontró que estos proyectos si pueden ser desarrollados bajo este marco, sin embargo, se realiza una evaluación de los componentes que pueden desarrollarse un poco más o que necesitan una cuidadosa revisión.

Entre estos componentes podemos resaltar puntos como en la sección 3.2.4.3. en la tabla 1 donde se visualiza la infraestructura asociada al proyecto se necesita articular esta tabla para los proyectos que no van ubicados en superficies de tierra, sino de agua, de acuerdo con la elección de escogencia para el desarrollo del proyecto como la infraestructura eléctrica ubicada en la superficie del cuerpo de agua, sistemas de anclaje de la estructura principal que va a soportar los paneles, infraestructura de apoyo para labores de mantenimiento e inspección, entre otros aspectos. Siguiendo la anterior sección, se puede visualizar en el numeral 3.2.4.4 en la tabla 2 que muestra la infraestructura y redes de servicios con las cuales puede interceptar el proyecto se presta especial atención a la descripción “usos asociados al recurso (p. e. usos recreativos)” dado como se secciones anteriores en este documento la mayoría de los embalses prestan servicios de usos recreativos, así se debería aclarar que la proyecto va a tener una cobertura del cuerpo de agua no mayor a un porcentaje establecido, y que a su vez puede llegar a impactar positivamente en el turismo de la región.

En la sección 4.2 que trata acerca del área de influencia se debe y en donde se explica como “aquella en la que se manifiestan los impactos ambientales significativos ocasionados por el desarrollo del proyecto” es necesario que se aclare que los impactos ambientales pueden también llegar a ser positivos en el desarrollo de proyectos FPV como lo son el evitar parte de la evaporación del cuerpo de agua y, de haber problemas con la calidad de agua por presencia de algas, pueden llegar a mejorar la calidad del agua en el área.

En la sección 5.1.4. Hidrología, se hace alusión al “uso y aprovechamiento del recurso hídrico en captaciones de agua” al igual que en la sección 10.2.1. en la cual se habla del plan de inversión forzosa de no menos del 1%. Es necesario hacer la aclaración en ambos puntos que de hacerse una captación de agua esta es mínima y será retornada al mismo lugar del cual se captó; en la mayoría de los casos la captación de agua se enfocará en tomar un porcentaje mínimo de agua, circularla por mangueras usando bombas, para poder enfriar los paneles solares y que estos trabajan más eficazmente y generen mayor energía, esta agua solo se deslizará en la superficie retornando al cuerpo de agua y las pérdidas que se generaran van hacer relacionadas con la evaporación de la misma. Considerando lo anterior, es necesario revisar estas secciones teniendo presente lo mencionado anteriormente y que la autoridad ambiental correspondiente pueda pronunciarse frente al tema.

Es importante mencionar que al finalizar la sección 10.2.1. se menciona que para poder hacer compensación de ecosistemas de agua dulce y marinos se deberán seguir los lineamientos que, una vez se adopte, el Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad en dichos ecosistemas tiene contemplado. En la realización de este documento no se ha visto este manual y por tanto sería oportuno hacer una mención específica a la ubicación del mismo de haberse publicado, mantener actualizados los términos de referencia.

¿Cómo dividir las empresas para la realización de este tipo de proyectos?

En Colombia las empresas con experiencia en la realización de proyectos de energía limpia serían las desarrolladoras de centrales hidroeléctricas, y podemos realizar una clasificación usando la capacidad instalada de generación, o la capacidad efectiva neta como característica principal, clasificando estas como grandes y con empresas con experiencia en licenciamiento ambiental. A estas se le pueden adicionar empresas que administran proyectos de más de 300 MW de generación hidroeléctrica en Colombia y, preferiblemente, generan energía por medio de otros proyectos diferentes a los hidroeléctricos.

A continuación, se hará un breve resumen de las empresas y los proyectos en el sector energético realizados más destacados en el país, resaltando proyectos hidroeléctricos, que como se ha expresado en este texto pueden ser objeto de operación conjunta con los sistemas solares fotovoltaicos flotantes:

- Las hidroeléctricas que más energía genera en Colombia son (Capacidad efectiva Neta) de acuerdo con XM: Guavio (1250 MW) propietario Enel, San Carlos propietario ISAGEN (1240 MW) y Chivor propietario AES Colombia (1000 MW).
- AES Colombia tiene dentro de sus proyectos: PCH Tunjita de 20 MW, proyecto eólico Jemeiwaa Kai 648 MW, proyecto solar para autogeneración Ecopetrol Planta Castilla Solar de 21 MW, y proyecto solar para autogeneración Cenit (filial Ecopetrol) Planta San Fernando Solar de 59 MW.
- ISAGEN tiene varios proyectos de generación hidroeléctrica dentro de sus proyectos, los de mayor generación son:

- Jaguas 170MW
- Miel I 396 MW
- Sogamoso 819 MW
- Enel tiene varios proyectos de generación hidroeléctrica dentro de sus proyectos, los de mayor generación son:
 - Dario Valencia 150 MW
 - Guaca 324 MW
 - Paraíso 276 MW

También, se podría asignar una clasificación como empresas medianas a las empresas de servicios públicos (E.S.P.) como acueductos, empresas que se encargan del manejo y disposición de aguas grises y negras o las empresas que administren y operen plantas de tratamientos de aguas residuales PTAR, de los municipios con cuerpos lenticos de tamaño mayor a las 50 hectáreas, o municipios donde se tengan embalses que tengan otros usos distintos al de generar energía hidroeléctrica, como usos recreativos, o de consumo humano.

Se propondría que las empresas que operen en municipios de tamaño pequeño (clasificación 4 y 5) pueden considerarse como empresas pequeñas donde se pueden realizar estos proyectos a menor escala en los cuerpos lenticos que se tengan en su territorio, dado que la población en estos municipios usualmente es muy pequeña.

Adicionalmente a la clasificación propuesta anteriormente es necesario incluir los proyectos de energía limpia que se tienen pronosticados realizar en los próximos años, de acuerdo con el periódico La Republica y datos de la UPME:



Ilustración 10 Conozca algunos de los proyectos que buscan avanzar en materia de energía limpia.

Fuente: La República

Obtenido de: <https://www.larepublica.co/especiales/negocios-sostenibles/conozca-algunos-de-los-proyectos-que-buscan-avanzar-en-materia-de-energia-limpia-3332135>

¿Cuáles son los impactos sociales?

Entre los impactos sociales más representativos que se visualizaron a lo largo de este trabajo de tener un sistema FPV podemos mencionar los siguientes:

- Podría llegar a reducir el espacio útil del cuerpo de agua que podría haber sido usado de otra manera, por ejemplo, para efectos recreacionales o pesca deportiva. Sin embargo, también se puede generar el efecto contrario, usando el sistema FPV para generar más turismo, educar a la población acerca del funcionamiento, ventajas y distintas características que se tienen con este tipo de proyectos.
- Dar acceso confiable y asequible a las comunidades que puedan estar asentadas en sitios remotos, sin usar (o usando muy poco) suelo, para su montaje y despliegue.
- Generar una calidad mejor de agua al evitar el crecimiento de algas en el cuerpo de agua que contamina el cuerpo lenticó.
- Creación de puestos de trabajo, dependiendo de la escala y la fase del proyecto se puede hacer una aproximación acerca de cuantos trabajadores serían necesarios. En la ilustración 11 se puede detallar los días y la cantidad de trabajadores por fases y escala (Tyagi et al., 2021).

Al tener un mecanismo de generación de energía cerca al cuerpo de agua se podrían ubicar y poner en funcionamiento sensores, controladores y softwares para poder tener un constante monitoreo de las características del cuerpo del agua para fines como mejorar la calidad del agua para la fauna presente en el cuerpo de agua, o para las personas que usan el cuerpo de agua con

fines recreativos o asegurarse que el cuerpo de agua cumpla los parámetros establecidos por la autoridad ambiental, entre otros. También se puede considerar en aumentar el valor turístico de la locación mediante la utilización de la energía para instalar equipos de refrigeración o calentadores para las personas que usan el lugar o agregar equipos de alumbrado público, reponer electricidad para las caravanas de automotores, entre otros fines.

Table ES1 Overview of Operations in Deploying a Floating Solar Photovoltaic Plant of Different Capacities

Project phase	Duration (days)		Number of people engaged	
	Small-scale	Mid-scale	Small-scale	Mid-scale
Business development	30	110	11	12
Design and pre-construction	15	14	6	2
Construction and commissioning	53	195	36	27
Maintenance	30*	Not available	5**	4**

* Typical duration of one periodic maintenance

** The number of permanent employees overseeing these activities. In addition, temporary staff is also sourced during each maintenance cycle, who carry out the maintenance activities like module cleaning. Source: CEEW-NRDC Analysis, 2020.

Ilustración 11 Tabla de Descripción General de Operaciones en el desarrollo de una planta solar flotante fotovoltaica de diferentes capacidades.

Obtenido de: Employment Potential of Emerging Renewable Energy Technologies (Tyagi et al., 2021)

Conclusiones:

Los proyectos solares fotovoltaicos (FPV) son una estrategia muy interesante para aumentar la generación de energía de fuentes limpias, su rendimiento es mucho mayor a los proyectos convencionales que se ubican en tierra y además pueden acondicionarse de manera tal que puedan

utilizar la infraestructura de los proyectos hidroeléctricos, que son los más desarrollados en Colombia. Si combinamos esto con el potencial de radiación para la generación de energía solar podemos ver que Colombia esta en un lugar ideal para llevarlos a cabo.

De acuerdo con el modelamiento se puede llegar a la conclusión que en Colombia se puede lograr al menos un 9.8% de mayor generación energética con base a los embalses evaluados en este documento y hay un potencial de generación de entre 23,300 GWh año y 25,900 GWh año si cubrimos el 20% de la superficie de los 28 embalses. Estos sistemas podrían llegar a generar unos 2,562 GWh año en comparación con los sistemas ubicados en tierra en las mismas ubicaciones evaluadas.

Los proyectos FPV generan empleo en sus fases de pre-inversión, diseño y construcción, que disminuye significativamente en su fase de operación y mantenimiento. Estos proyectos también ayudarían a preservar mejor el recurso hídrico al disminuir su evaporación y, a su vez, ayudaría a combatir o prevenir el crecimiento de algas en el cuerpo de agua. En el país hay poblaciones en locaciones remotas y la gran mayoría del territorio tiene unas temperaturas ambiente altas, lo que genera que el recurso hídrico sea muy importante, los proyectos FPV ayudarían en ambos aspectos.

En Colombia el marco legal para promover e impulsar el desarrollo de estos proyectos está bastante desarrollado y sin duda se ve el interés del legislador por ayudar en este esfuerzo, sin embargo, la aplicación de la norma en las instituciones estatales para el desarrollo y la implementación es aún muy joven, por ello aún falta claridad para poder desempeñar con rapidez y eficiencia los procesos establecidos en la norma. Por el momento solo se tiene 2 ejemplos de este tipo de proyectos en Colombia a muy pequeña escala y 1 de estos obtuvo un permiso de ocupación de cauce para el espejo de agua.

Cada vez más se discute a nivel global la manera más eficiente de realizar una transición hacia un uso de energía más limpio y amigable con el medio ambiente. Viendo las cualidades que tienen estos sistemas y nuestra posición geográfica, Colombia es un lugar donde podríamos sacar gran provecho de la integración de proyectos energéticos con sistemas FPV.

Bibliografía:

Barón Cáceres, F. A. (2019). *Inventario de las represas en Colombia* [Especialización en Recursos

Naturales Hidraulicos y Medio Ambiente]. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio

Garavito.

Cabrera-Tobar, A., Bullich-Massague, E., Araguees-Penalba, M., & Gomis-Bellmunt, O. (2016).

Topologies for large scale photovoltaic power plants. *RENEWABLE & SUSTAINABLE*

ENERGY REVIEWS, 59, 309-309–319. Science Citation Index.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.362>

Cazzaniga, R., Cicu, M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M., & Ventura, C. (2018). Floating

photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 81(Part 2), 1730-1730–1741. ScienceDirect.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.269>
- Choi, Y.-K. (2014). A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International journal of software engineering and its applications*, 8(1), 75–84.
- Culley, M. (2016, julio 20). Yamakura Floating Solar Case Study. *Energy and the Environment-A Coastal Perspective*. <https://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu/ocean-energy-generating-technologies/offshore-solar-case-studies/yamakura-floating-solar-case-study/>
- Dai, J., Zhang, C., Lim, H. V., Ang, K. K., Qian, X., Wong, J. L. H., Tan, S. T., & Wang, C. L. (2019). Design and construction of floating modular photovoltaic system for water reservoirs. *Energy*, 191.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219322443>
- Gaitan Torres, S. A. (2020). *Modelamiento de la temperatura superficial de los paneles de una red experimental de 7.8 kWp* [Trabajo de investigación]. Universidad de Ibagué.
- Guash Murillo, D. (2003). *Modelado y Análisis de sistemas fotovoltaicos* [Tesis Doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Haas, J., Khalighi, J., de la Fuente, A., Gerbersdorf, S. U., Nowak, W., & Chen, P.-J. (2020). Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management*, 206. ScienceDirect.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414>
- IDEAM. (2018). *Atlas climatológico, radiación y viento*.
- IDEAM, & UPME. (2005). *Mapas de Radiación Solar sobre una Superficie Plana*.
http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf
- Lightsourcebp. (2016, marzo 10). *Reservoir Floating Solar*. <https://www.lightsourcebp-ha.com/en/stories/325/>

- Liu, H., Krishna, V., Lun Leung, J., Reindl, T., & Zhao, L. (2018). Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(12), 957-957–967. Scopus®.
<https://doi.org/10.1002/pip.3039>
- Decreto 1076 de 2015. Recuperado el 22 de mayo de 2021, de
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA. (2017). *Términos de Referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental—EIA en Proyectos de uso de Energía Solar Fotovoltaica*.
- Ministerio del Medio Ambiente, & Convenio Andrés Bello. (2002a). *Manual de evaluación de estudios ambientales: Criterios y procedimientos*.
- Ministerio del Medio Ambiente, & Convenio Andrés Bello. (2002b). *Manual de Seguimiento Ambiental de Proyectos: Criterios y procedimientos*.
- Ministerio del Medio Ambiente, & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*.
- Padilha Campos Lopes, M., de Andrade Neto, S., Alves Castelo Branco, D., Vasconcelos de Freitas, M. A., & da Silva Fidelis, N. (2020). Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semiarid region of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 273. ScienceDirect.
<http://ez.urosario.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip&db=edselp&AN=S0959652620320576&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- PI Power Insider. (2021, junio 2). *Scotra awarded FPV construction project for Taiwan Wushantou Hydroelectric dam*. <https://www.pimagazine-asia.com/scotra-awarded-fpv-construction-project-for-taiwan-wushantou-hydroelectric-dam/>

- Pincay Lozada, J. L. (2017). *Análisis experimental de la relación de la temperatura de operación de un modulo fotovoltaico y su voltaje de circuito abierto* [Maestría en Ingeniería]. Universidad Autónoma de Occidente.
- Pouran, H. M., Lopes, M. P. C., Nogueira, T., Branco, D. A. C., & Sheng, Y. (2022). Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology. *Iscience*, 105253.
- Rosa-Clot, M., & Tina, G. M. (2018). Chapter 5—The Floating PV Plant. En *Submerged and Floating Photovoltaic Systems* (pp. 89–136).
- Saifuddin Jamalludin, M. A., Muhammad-Sukki, F., Abu-Bakar, S. H., Ramlee, F., Munir, A. B., Bani, N. A., Muhtazaruddin, M. N., Mas'ud, A. A., Ardila Rey, J. A., Ayub, A. S., & Sellami, N. (2019). Potential of floating solar technology in Malaysia. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 10(3), 1638–1644.
<https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i3.pp1638-1644>
- Sembcorp Industries. (2021, noviembre). *The Sembcorp Tengeh Floating Solar Farm, Singapore*.
<https://www.sembcorp.com/en/media/multimedia-centre/multimedia-Details-photo?mediaId=17697>
- Serna Cuenca, J. & Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2015). *Velocidad Promedio del Viento a 10 metros de altura (m/s) Anual* [Map].
- Silva, G. D. P. D., & Branco, D. A. C. (2018). Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 36(5), 390–400. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1477498>
- Tyagi, A., Neeraj, K., & Madhura, J. (2021). *Employment potential of emerging renewable energy technologies. Insights from the floating solar industry*. Council on Energy, Environment, and Water; Natural Resources Defense Council; and Skill Council for Green Jobs.
<https://www.nrdc.org/sites/default/files/renewable-energy-employment-ib-202103.pdf>

- UPME. (2021, mayo 3). *Energía Eléctrica SIN (Sistema Interconectado Nacional)*. UPME (Unidad de Planeación Minero Energética).
- <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx>
- World Bank Group. (2015). *Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants—A Project Developer's Guide*. International Finance Corporation IFC.
- World Bank Group, ESMAP, & SERIS. (2019a). *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners* (ESMAP Paper 143112; Where Sun Meets Water, p. 146). World Bank Group.
- <http://documents1.worldbank.org/curated/en/418961572293438109/pdf/Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners.pdf>
- World Bank Group, ESMAP, & SERIS. (2019b). *Where Sun Meets Water (Vol. 2): Floating Solar Market Report (English)* (ESMAP Paper 131291; Where Sun Meets Water, p. 122). World Bank Group.
- <http://documents1.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf>
- XM, Ministerio de Minas y Energía, UPME, IDEAM, ECDBC, Dávila, P., Sánchez Rippe, J. D., Turriago, J. D., Herrera, H., & Gaviria, J. C. (2020). *Cálculo del factor de emisiones de la red de energía eléctrica en Colombia* (p. 27).
- https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_FE_del_SIN_2019_Dic_2020.pdf