



Medición del cambio en la recarga del acuífero Río Grande de la Magdalena causado por proyectos de energía fotovoltaica y disminución del impacto con la aplicación agrovoltaica.

Measurement of the change in the recharge of the Río Grande de la Magdalena aquifer caused by photovoltaic energy projects and decrease of the impact with agrovoltaic application.

Nestor Ferney Abaunza Gomez

Trabajo de grado modalidad pasantía académica para optar al título de Geólogo

Asesoras

Esp. Lina Marcela Marin Ramirez

Esp. Paola Alejandra Vásquez Cardona

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

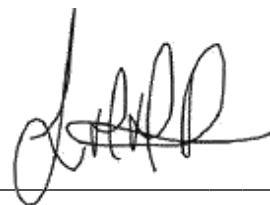
Departamento de Ciencias Geológicas

Manizales

2023

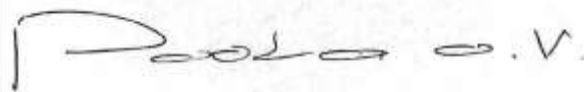
Nota de aceptación

Aprobado



Lina Marcela Marin Ramirez

Asesor Académico



Paola Alejandra Vásquez Cardona

Asesor Académico

A mis Nonos.

Tabla de contenido

Resumen.....	7
Abstract.....	10
Introducción	11
Generalidades.....	17
Pregunta de investigación	17
Planteamiento del problema.....	17
Objetivos.....	18
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos	18
Zona de estudio - RGM.....	19
Unidades Hidrogeológicas	25
Sistemas de acuíferos con baja a moderada productividad (A1).....	25
Sistemas de acuíferos de baja a muy baja productividad (A2).....	25
Geología.....	27
Metodología	29
Delimitación de las áreas óptimas de expansión fotovoltaica.....	30
Adquisición de datos en campo	35
Modelación hidrológica	35

Evaluación de aplicación (Agrovoltaica).....	38
Propuesta pedagógica ACGGP	42
Resultados parciales.....	43
Áreas óptimas de expansión.....	43
Puntos de muestreo de infiltración.....	44
Visualización de coberturas y variación espacial de variables edáficas.	47
Elección de cultivo – Aloe Vera (Sábila).....	50
Localización piloto agrovoltaico.....	51
ACGGP – Pedagogía y divulgación.....	52
Conclusiones.....	53
Recomendaciones	54
Referencias.....	56

Lista de tablas

Tabla 1 Archivos vectoriales, zona de estudio.....	24
Tabla 2 Criterios, formato y fuentes de archivos geográficos.....	31
Tabla 3 Ponderación de archivos geográficos.....	33
Tabla 4 Matriz de cultivos. Agrovoltaica.....	40
Tabla 5 Características de los puntos de muestreo.....	46

Lista de figuras

Figura 1 Datos de interés. Sexto informe de evaluación del IPCC	12
Figura 2 Análisis multidimensional de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático, Caldas... 13	
Figura 3 Crecimiento de la energía solar fotovoltaica, global, nacional y departamental	15
Figura 4 Localización zona de estudio, acuífero Río Grande de la Magdalena.....	19
Figura 5 Valores de oferta, demanda y calidad del agua por subzona hidrográfica (RGM), ENA 2022.....	20
Figura 6 Proyectos fotovoltaicos La Dorada (Caldas), generación y conexión... ..	22
Figura 7 Erosión hídrica potencial anual y mensual por subzona hidrográfica (RGM)	23
Figura 8 Unidades hidrogeológicas RGM	26
Figura 9 Geología Regional.....	28
Figura 10 Ruta metodológica.....	30
Figura 11 Entradas ráster, evaluación zonas optimas de expansión fotovoltaica	34
Figura 12 Cambios proyectados de precipitación y temperatura, mejor conjunto CMIP6, Colombia.....	37
Figura 13 Áreas con potencial fotovoltaico, resultado ráster obtenido... ..	43
Figura 14 Correlación espacial; áreas con potencial fotovoltaico, zonas potenciales de recarga. (RGM).....	44
Figura 15 Puntos de muestreo de infiltración propuestos	45

Figura 16 Visualización de datos asociados a evapotranspiración RGM	48
Figura 17 Gráfico lineal temporal. Comparativo Ec-Es, GPP	49
Figura 18 Propuesta de área para la instauración del piloto agrovoltaico	51

Resumen

El cambio del uso del suelo debido a la expansión de proyectos de energía fotovoltaica genera una disminución del área de infiltración, y con ello, un aumento de la impermeabilización, lo cual, sin la correcta planeación, tiene el potencial de producir un efecto adverso sobre la oferta y calidad del recurso hídrico subterráneo. El proyecto plantea cuantificar la variación en la recarga del acuífero Río Grande de la Magdalena (RGM), mediante el uso de simulaciones del ciclo hidrológico en SWAT (Soil & Water Assessment Tool), para el período (2024-2054), dando uso a las proyecciones de Modelos Climáticos Globales (MCG), bajo el mayor escenario de emisiones, junto con las zonas propensas a albergar dicha infraestructura.

Como segunda etapa, se plantea el uso compartido del suelo mediante la instalación de un piloto agrovoltaico (AGV) de Aloe Vera, determinando los coeficientes de variación con respecto a la afectación calculada del modelo tradicional fotovoltaico. Los resultados serán divulgados a la comunidad del área de influencia, con el apoyo del área de pedagogía de la asociación colombiana de geólogos y geofísicos del petróleo (ACGGP).

Palabras clave: recarga de aguas subterráneas, uso del suelo, fotovoltaica, agrovoltaica, cambio climático, SWAT, ODS.

Abstract

The change in land use due to the expansion of photovoltaic energy projects generates a decrease in the infiltration area, and with it, an increase in impermeability, which without proper planning, has the potential to produce an adverse effect on the supply and quality of groundwater resources. The project proposes to quantify the variation in the recharge of the Río Grande de la Magdalena (RGM) aquifer, through the use of hydrological cycle simulations in SWAT (Soil & Water Assessment Tool), for the period (2024-2054), making use of Global Climate Model (GCM) projections, for the largest emissions scenario, together with the areas likely to host such infrastructure.

As a second stage, land sharing is proposed through the installation of an agrivoltaic pilot (AGV) of Aloe Vera, determining the coefficients of variation with respect to the calculated impact of the traditional photovoltaic model. The results will be divulged to the community of the area of influence, with the support of the pedagogical area of the Colombian Association of Geologists and Petroleum Geophysicists (ACGGP).

Keywords: Groundwater recharge, Land use, Photovoltaic, Agrivoltaic, Climate change, SWAT, ODS.

Introducción

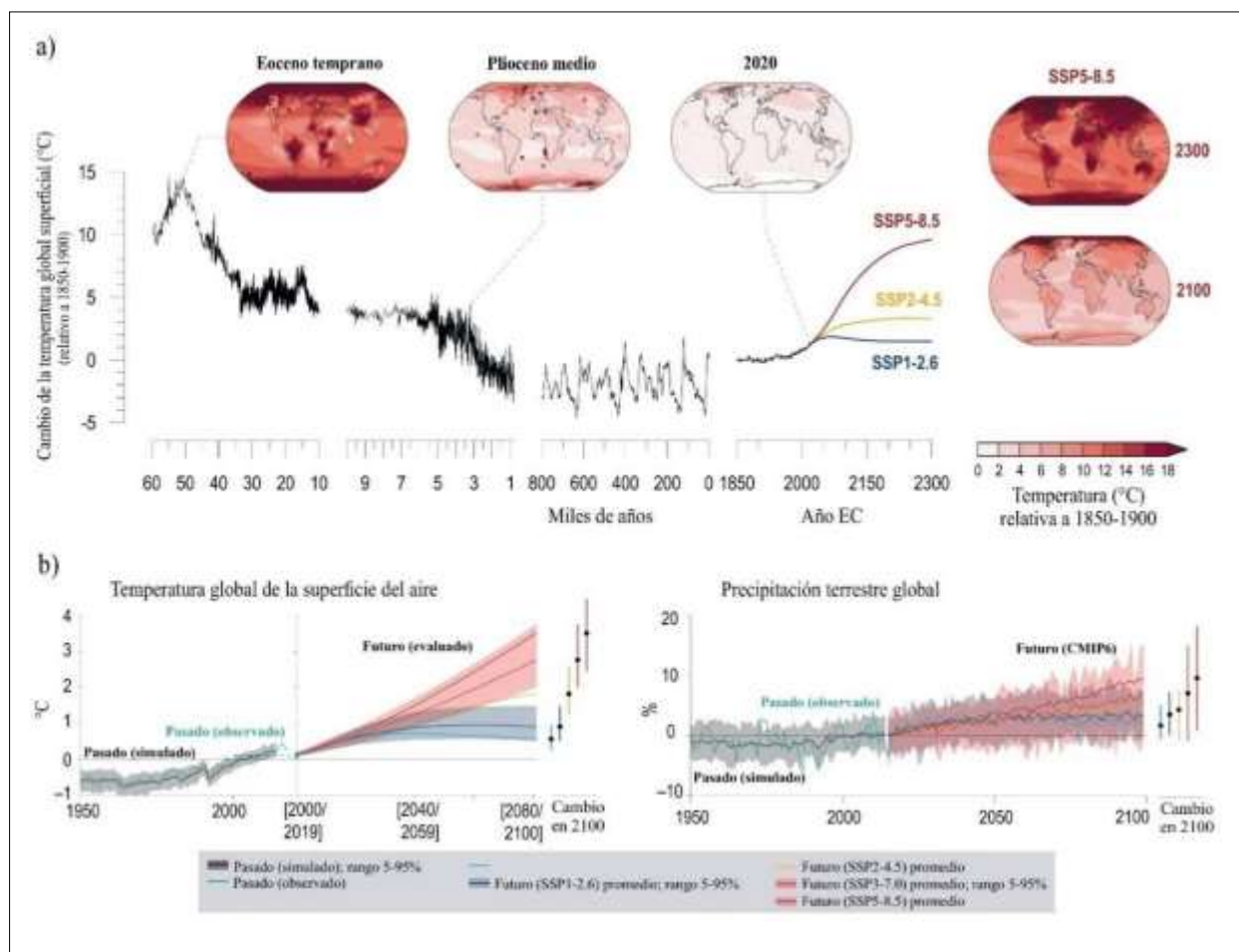
Las aguas subterráneas representan más del 97 % del agua dulce líquida disponible (Shiklomanov, 1997), supliendo el 35% de la demanda a nivel global; siendo el riego, el uso doméstico y la industria sus usos principales (Döll et al., 2012). En cuanto a las aguas superficiales, estas presentan una menor susceptibilidad de afectación debido a cambios en precipitación y temperatura, sin embargo, dichas variables acompañadas de variaciones no climáticas, tienen el potencial de influir en aspectos como la reducción de la recarga, el aumento de la demanda y cambios en la calidad (L. Bolaños-Chavarría & Betancur Vargas, 2018; Clifton et al., 2010).

Por su parte, el cambio de coberturas debido a la expansión urbanística, agrícola y de infraestructura en general, genera una reducción de la infiltración, con un aumento de la evapotranspiración y escorrentía superficial; descendiendo el porcentaje de precipitación de recarga (Owuor et al., 2016; Siddik et al., 2022). Zhang et al. (2019), reporta un incremento global significativo de la evapotranspiración bajo el período de estudio 2000-2017. De ahí que estudios recientes demuestran el creciente impacto combinado del cambio climático y uso del suelo, en la calidad y disponibilidad del recurso hídrico subterráneo (Caretta et al., 2022; Sajjad et al., 2022; Wu et al., 2020).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su sexto informe de evaluación describe variaciones en la recarga de las aguas subterráneas debido al incremento de la evapotranspiración, alteración en los patrones espaciales y cantidad de precipitaciones (Pörtner et al., 2022). Para un calentamiento global igual o superior a 2 °C, se prevé un aumento de la intensidad y frecuencia de las sequías y precipitaciones (Arias et al., 2021.-a). Huang et al. (2019), bajo un escenario de 4 °C en el año 2100, estima un aumento del 14% en la demanda de agua, directamente atribuible al cambio climático.

Figura 1

Datos de interés. Sexto informe de evaluación del IPCC



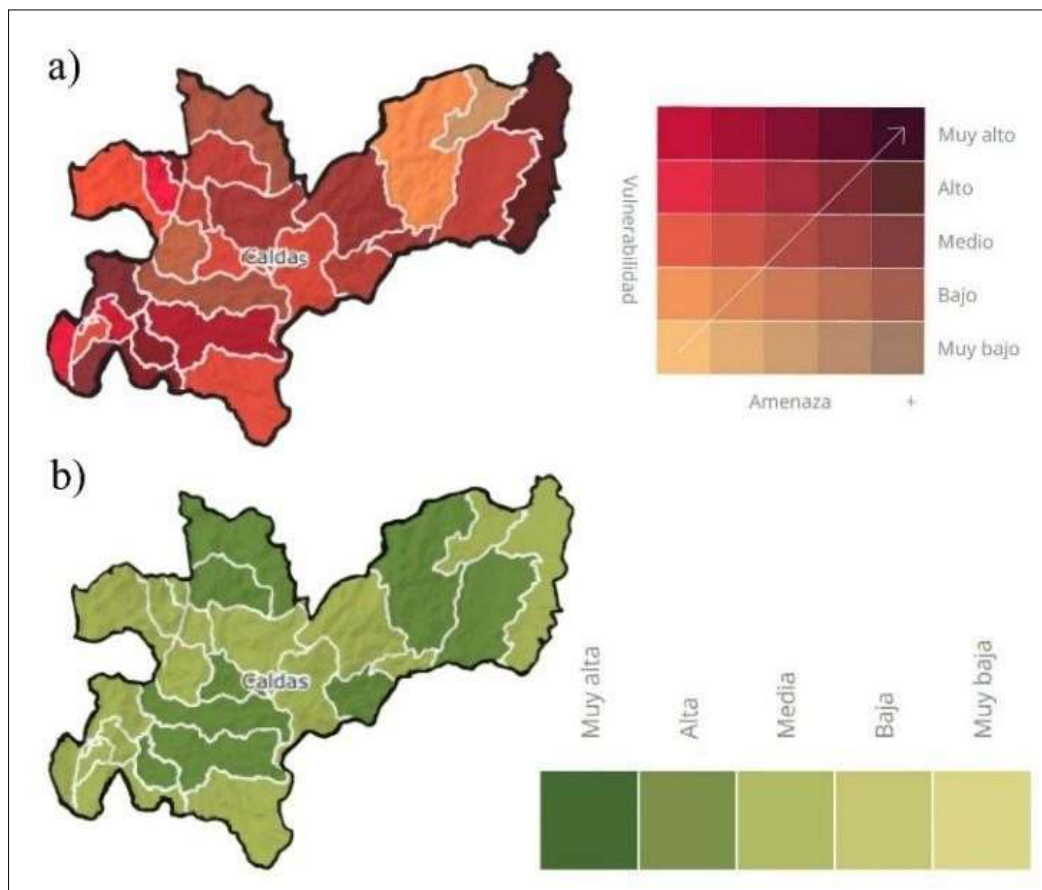
Nota. a) Cambios de temperatura global superficial (relativo a 1850-1900), desde períodos pasados, hasta los próximos 300 años. b) Cambios de temperatura y precipitación; observados, simulados y proyectados, en comparación con la media de 1995-2014, diferenciados por escenario hasta 2100. Modificada de Arias et al. (2021.-a).

En el país para el período 2071-2100, se calculan aumentos de hasta 3.6°C bajo la Trayectoria de Concentración Representativa (RCP) 8.5; y se definen los trimestres DEF y SON, como aquellos que presentaran los mayores valores (Villegas Villa, 2021). El departamento de Caldas, según la tercera comunicación nacional en la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático (CMNUCC), presentará un incremento de temperatura de hasta 1,2 °C para 2040; en concreto, la subregión del Magdalena Caldense (Samaná, Victoria, Norcasia, La Dorada)

es clasificada en muy alto riesgo climático, con intervalos de 3-5 meses de sequía para el período 2017-2050 (Corpocaldas, 2019b; Gutiérrez, 2022; IDEAM et al., 2017; Ocampo, 2019).

Figura 2

Análisis multidimensional de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático, Caldas.



Nota. a) Riesgo, b) Capacidad adaptativa. Fuente. IDEAM et al., (2017).

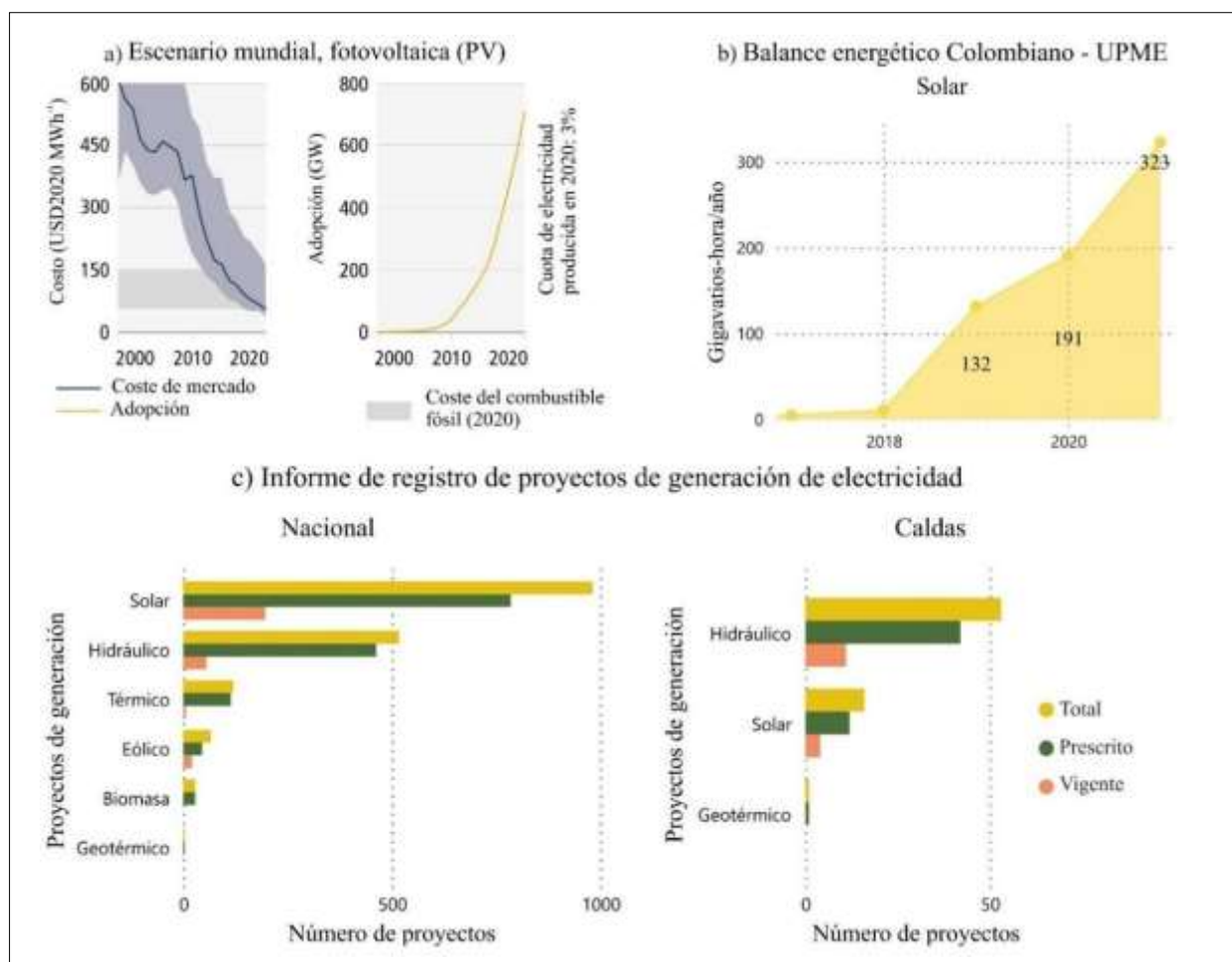
A nivel nacional, Bolaños-Chavarría et al. (2023), a partir de datos “mascon” de GRACE, estima cambios en el almacenamiento de la cuenca del Magdalena, para acuíferos libres asociados a humedales; relacionados principalmente con las fases de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y definidos mediante cambios en el almacenamiento, con una resolución de ~55 km. Se tiene registro de una disminución uniforme de agua, tanto subterráneo como superficial desde finales de 2010,

guardando relación con ENOS, el cual afecta de manera significativa las variables hidro-climáticas (Bolaños et al., 2020; Corpocaldas, 2018; Poveda & Mesa, 1996). A nivel edáfico Restrepo & Escobar (2018) consideran para la cuenca un incremento de la tasa de erosión del 34%, período 2000-2010, siendo la antropogénica superior a la climática.

Por otra parte, la generación de energía eléctrica en Colombia se soporta principalmente en el sector hidroeléctrico, representando el 70% de la capacidad energética instalada (Diez et al., 2018). El cambio climático, en un escenario seco, plantea una reducción del 10% - 15% en la generación para el 2050 (Arango-Aramburo et al., 2019); por ello, con el objetivo de reducir las emisiones de efecto invernadero y diversificar la matriz energética nacional, se presenta la energía solar fotovoltaica con un notable crecimiento, y reducción de costos de generación (Pathak et al., 2022; Zapata et al., 2023a). Siendo el valle del Magdalena, un espacio potencialmente aprovechable, con valores considerables de radiación (IDEAM, 2014.).

Figura 3

Crecimiento de la energía solar fotovoltaica, global, nacional y departamental.



Nota. a) Costos globales por unidad de energía fotovoltaica (USD por MWh) y su adopción (GW); la línea azul continua indica el coste unitario medio en cada año, el sombreado gris ilustra la gama de costes unitarios de la nueva energía, generada con combustibles fósiles (carbón y gas) en 2020 (55-148 USD por MWh). b) Crecimiento de la energía solar fotovoltaica en Colombia, balance energético (BECO). c) Proyectos de generación de energías renovables, nivel nacional y departamental. Fuente. a) Pathak et al., (2022). b) UPME, (2021). c) Zapata et al., (2023b).

A pesar de que el nivel de desarrollo actual de energía fotovoltaica, debido a su escala, no representa a la fecha una afectación considerable; el interrogante se plantea en el espacio y tipo de infraestructura, que puedan incrementar el nivel de producción, sin comprometer el recurso hídrico. El lograr integrar aspectos climáticos con cambios edáficos, posibilita un aumento en la

comprensión del fenómeno, lo cual propicia un adecuado desarrollo territorial, sustentado en el aprovechamiento sostenible de los recursos disponibles.

En consecuencia, el proyecto busca mejorar el conocimiento del acuífero en lo que concierne a su respuesta a cambios tanto climáticos como de coberturas del suelo, esto mediante la generación de información a partir de herramientas de teledetección y modelación, lo cual, permitirá avanzar en el planteamiento de alternativas de aprovechamiento, de la mano de la participación comunitaria.

Como una alternativa de aprovechamiento de la energía solar, en la búsqueda de la disminución de la posible afectación, se plantea el método agrovoltaico, el cual plantea la integración de infraestructura fotovoltaica con el aprovechamiento del suelo mediante la instauración de cultivos agrícolas. Dado que mejora la respuesta edáfica al cambio de cobertura, debido a la disminución de la radiación y por ende la temperatura media, se crean condiciones favorables para la instauración de cultivos agrícolas (Marrou et al., 2013; Schindele et al., 2020), puesto que propicia un aumento del rendimiento de dichos cultivos, al tiempo que se produce energía limpia, se reduce el gasto de agua y se disminuye el conflicto por uso del suelo (Amaducci et al., 2018; Cusva, 2022).

Generalidades

Pregunta de investigación

¿Qué efectos tendría sobre la recarga del acuífero Río Grande de la Magdalena, el aumento de infraestructura fotovoltaica tradicional (Ground-Mounted), bajo escenarios de cambio climático?

Planteamiento del problema

En la búsqueda de la reducción de los gases de efecto invernadero y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS - Agenda 2030), la ejecución de proyectos de energía fotovoltaica presenta un notable crecimiento, a nivel mundial, nacional y local (Galvís-Villamizar et al., 2022; Kruitwagen et al., 2021; Pathak et al., 2022; Rodríguez-Urrego & Rodríguez-Urrego, 2018; UPME, 2021). El acuífero Río Grande de la Magdalena (RGM), en su sector este, municipio de La Dorada (Caldas), presenta en ejecución proyectos de generación con valores superiores a 80kw, como de menor magnitud (UPME, 2023a, 2023b; Zapata et al., 2023b), con tendencia a aumentar, debido a sus altos niveles de radiación, topografía llana, infraestructura y ubicación geográfica.

La infraestructura fotovoltaica representa una barrera en el proceso de infiltración de la precipitación; para el acuífero RGM, a la fecha no han sido definidos los efectos sobre su recarga, los cuales pueden ser potenciados durante el tiempo de operación, por variaciones en temperatura y precipitación, debidas al cambio climático. Los estudios disponibles, no contemplan los potenciales efectos sobre el agua subterránea, debido a este cambio de cobertura; de igual manera, a pesar del potencial que alberga la región, se carece de una estimación de la superficie propensa a albergar dicha infraestructura.

Objetivos

Objetivo general

Establecer la variación en la recarga del acuífero Río Grande de la Magdalena, debido al aumento de infraestructura fotovoltaica convencional, teniendo en cuenta cambios futuros en precipitación y temperatura.

Objetivos específicos

Desarrollados

- Delimitar las áreas óptimas de expansión de proyectos fotovoltaicos en la jurisdicción del acuífero Río Grande de la Magdalena (RGM), con base en la información secundaria disponible.
- Plantear la toma de datos de infiltración y proponer la localización espacial de los puntos.
- Definir el modelo hidrológico y enunciar los insumos disponibles para la modelación.
- Formular el método agrovoltaico como alternativa de aprovechamiento.
- Establecer una propuesta pedagógica.

Propuestos

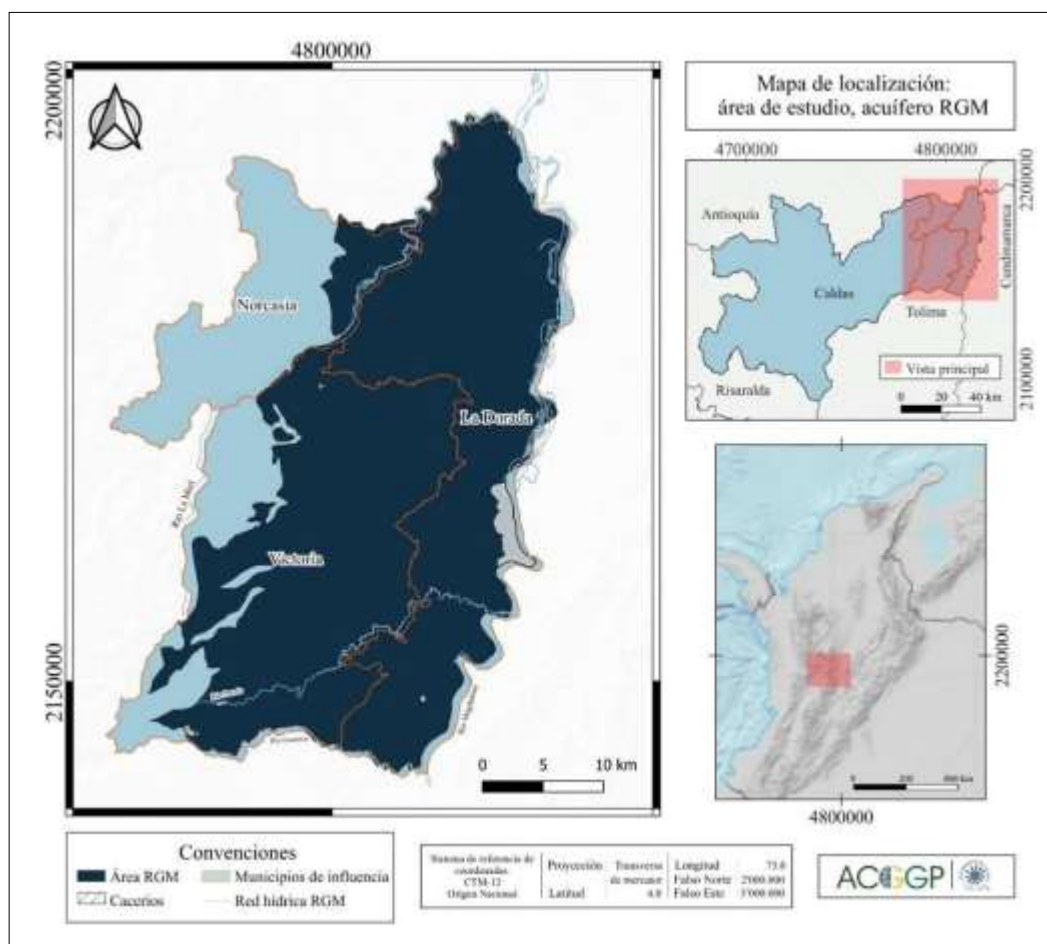
- Analizar los datos climáticos seleccionados.
- Realizar estimaciones de variación en la recarga del acuífero bajo el mayor escenario de concentración de gases de efecto invernadero (GEI), junto con una variación espacial en permeabilidad.
- Demostrar cómo la implementación agrovoltaica supone una alternativa de aprovechamiento.
- Desarrollar labores de pedagogía y divulgación de resultados.

Zona de estudio - RGM

En la cuenca del valle medio del Magdalena, jurisdicción de Caldas, se localiza el acuífero Río Grande de la Magdalena (RGM), comprendiendo la totalidad del municipio de La Dorada (Caldas) junto con sectores de Victoria y Norcasia (Caldas). RGM comprende 1001,41 km², con una capacidad almacenada de 27702.8 Mm³ y una clasificación iónica principalmente de tipo Bicarbonatada- Cálctica- Magnésica (Corpocaldas, 2018). Su demanda se evalúa en 42,88 litros porsegundo, distribuida principalmente en el sector pecuario; de igual modo, este abastece a gran parte de la población de su sector norte (Abarca, 2021; Corpocaldas, 2018).

Figura 4

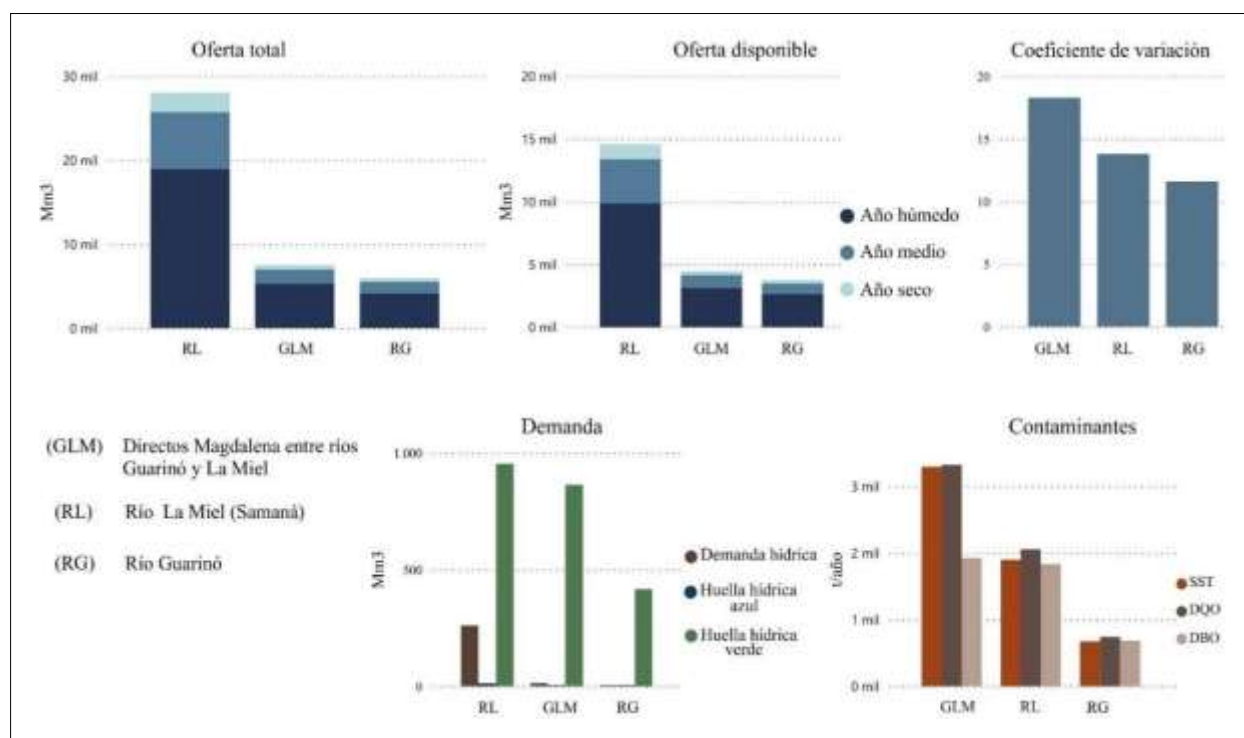
Localización zona de estudio, acuífero Río Grande de la Magdalena.



Producto de la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), esta área exhibe dos períodos húmedos, marzo– mayo y septiembre–noviembre (S. Bolaños-Chavarría et al., 2022); además, tiene incidencia en el almacenamiento de los sistemas acuífero-humedal, positiva para los meses de mayo y septiembre, y negativa para enero–febrero (S. Bolaños-Chavarría et al., 2023). El área de estudio corresponde mayormente a la subcuenca “Directos Magdalena entre ríos Guarínó y La Miel”, la cual para el acuífero, es aquella subzona hidrográfica que presenta la mayor variación en su oferta anual, además de reportar los menores valores de esorrentía a nivel departamental (Corpocaldas, 2019a; IDEAM, 2023b).

Figura 5

Valores de oferta, demanda y calidad del agua por subzona hidrográfica (RGM), ENA 2022.



Nota. Fuente: Modificado de: Anexo 1, Estudio Nacional del Agua 2022 (IDEAM., 2023b).

En el aspecto fotovoltaico, la porción que suscita interés corresponde al municipio de La Dorada, el cual se encuentra ubicado al margen izquierdo del río Magdalena, al oriente del

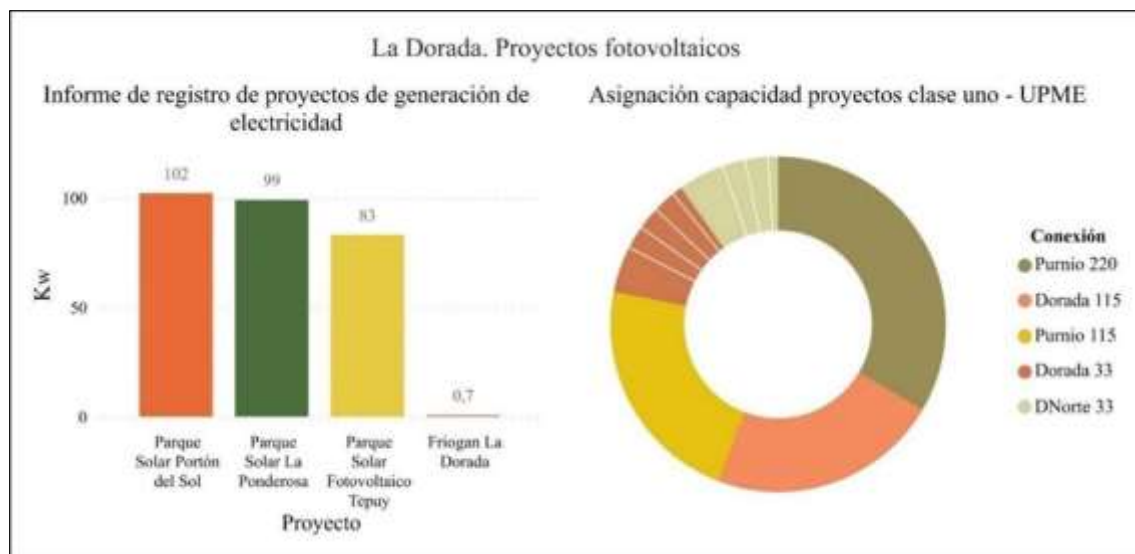
departamento de Caldas. Para este municipio se estiman aumentos críticos de temperatura de hasta 2,6 °C para el período 2071 – 2100, junto con un incremento de duración de las sequías (2 a 4 meses) y anomalías en la precipitación anual entre los rangos de -9 y 20% (2011 – 2040), y -9 y 30% (2041 – 2070); además, se encuentra entre los municipios que superan el 80% de su área, con una afectación debida a erosión moderada (IDEAM et al., 2017; Ocampo et al., 2019; Ocampo, 2019b). Según el CMNUCC, este presenta un nivel alto de riesgo por cambio climático, el más elevado del oriente caldense; exhibiendo una capacidad adaptativa media y una alta sensibilidad (IDEAM et al., 2017).

La Dorada basa su economía en la ganadería, siendo la producción de carne y lácteos la principal actividad (IRMAC, s.f.). Cuenta con una población de 70.802 habitantes distribuidos en 28.338 hogares (DANE, 2018); según el Sisbén IV, presenta un índice de pobreza multidimensional (IPM) de 25,1 puntos porcentuales (DNP, s.f.). Se posiciona además como el segundo municipio a nivel departamental, tanto en población, como en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el principal emisor del sector pecuario (Ocampo, 2019).

El municipio es catalogado como una zona semihúmeda, con una altura de 178 m.s.n.m. y una temperatura promedio de 28°C, radiación con valores de 2100 KWh/m² /año, e irradiación global horizontal en el rango de 4.5 –5 KWh/m² (IDEAM, 2014; Inteinsa, 2018; IRMAC, s.f.). Esto junto con su ubicación geográfica y baja pendiente, le permite tener un alto potencial de aprovechamiento fotovoltaico. De ahí que a corte de noviembre 30 de 2022, presente en ejecución dos proyectos fotovoltaicos con una producción conjunta de 185 Mw (Zapata et al., 2022). No obstante, la UPME, tanto en el último informe de generación, como en la asignación de proyectos clase uno, reporta para el municipio información de proyectos de menor capacidad (UPME, 2023a; Zapata et al., 2023b).

Figura 6

Proyectos fotovoltaicos La Dorada (Caldas), generación y conexión.



Nota. Fuente. Modificado de Informe de registro (2023), proyectos clase uno UPME.

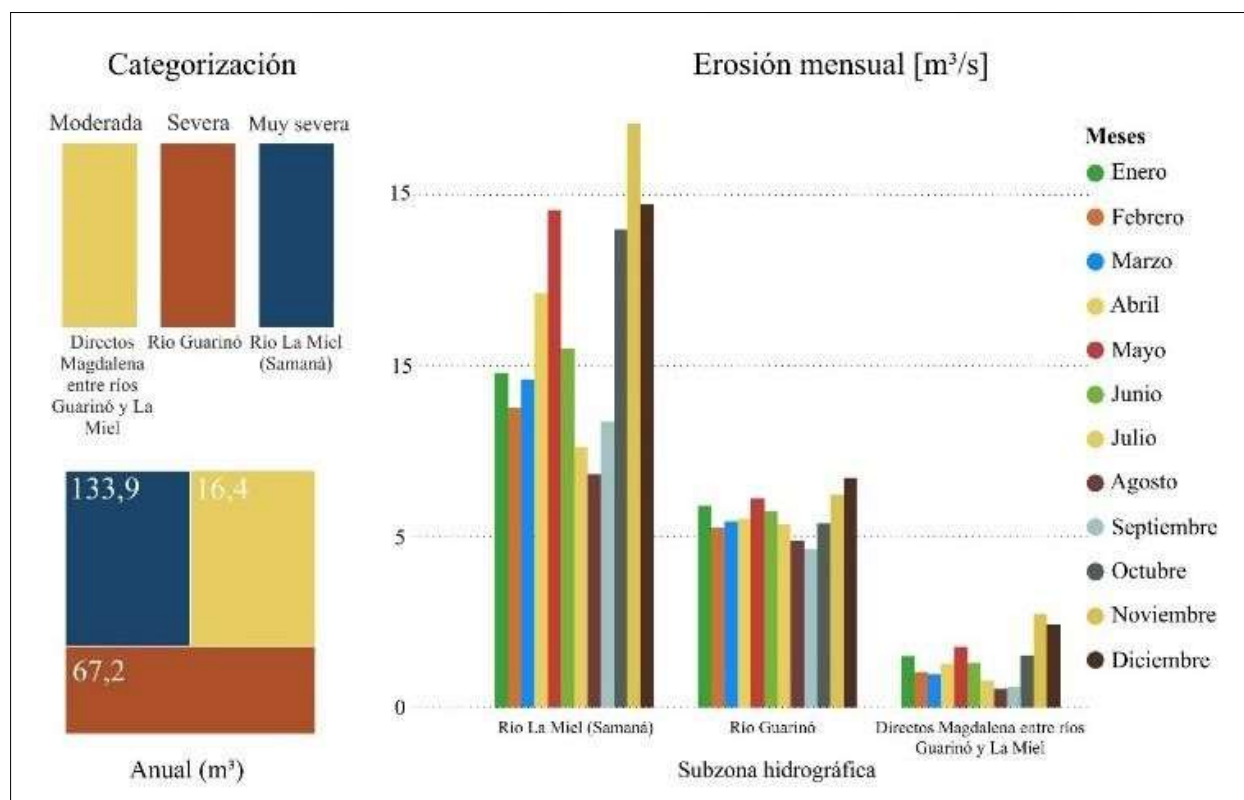
El proyecto “Parque Solar Fotovoltaico Tepuy”, conectado a subestación Purnio (115Kw), se ejecuta en la vereda Santa Helena, con un área de influencia de 741,24 ha, de las cuales 220,39 albergarán entre 242.432 y 269. 370 módulos fotovoltaicos de 360–450 Wp (SAG & EPM, 2020a, 2020b). Por otra parte, el proyecto “Parque Solar Portón del sol” localizado en las veredas Santa Helena - La Arenosa, posee un área de intervención de 216,16 hectáreas (ANLA, 2021). Lo cual, de manera conjunta, representan un área de influencia abiótica de 1370.27 hectáreas (ANLA, 2021; SAG, 2020).

Por su parte, la erosión a nivel departamental supera el 70% del territorio, con valores de 81,9% de magnitud y 3,0% de severidad (IDEAM & U.D.C.A, 2015), ubicándose entre los departamentos con mayores volúmenes de erosión hídrica (IDEAM, 2023a). En cuanto a las subzonas hidrográficas que conforman el acuífero RGM, estas presentan valores de erosión hídrica

por encima del promedio en los meses de mayo, noviembre–diciembre; siendo la cuenca de río La Miel, la cual alberga la mayor extensión de recarga, la que exhibe los mayores valores a escala anual (Corpocaldas, 2019a; IDEAM, 2023c).

Figura 7

Erosión hídrica potencial anual y mensual por subzona hidrográfica (RGM).



Nota. Fuente: Modificado del anexo 5a del Estudio Nacional del Agua 2022 (IDEAM., 2023c).

El polígono estipulado en el presente estudio, enmarcado por el perímetro del RGM (Corpocaldas, s.f.-b), engloba áreas protegidas, humedales, fuentes abastecedoras departamentales, vías terrestres de los tres órdenes, tramo de vía férrea, líneas eléctricas con voltajes de 115 kv y 230 kv, junto con la subestación eléctrica el Purnio (ANI, 2021; CHEC, s.f.; Corpocaldas, s.f.-b; INVIAS, s.f.; ISA & DNP, 2018; RUNAP, s.f.;(Corpocaldas, s.f.-a) (Tabla

1). A pesar de su escala, la inclusión de los humedales se realiza debido a la relación hidrológica de funcionamiento entre estos y las aguas subterráneas; los cuales se prevé que en zonas de clima árido y semiárido, pasaran a ser una zona de recarga (Betancur-Vargas et al., 2017). Por último, los caseríos corresponden a los centros poblados contenidos en los municipios de La Dorada, Victoria, Norcasia.

Tabla 1

Archivos vectoriales, zona de estudio.

Áreas protegidas	Distritos Nacionales de Manejo Integrado	Madrevieja de Guarinocito, Cuchilla de Bellavista	
Fuentes abastecedoras departamentales	Distrito Magdalena Caldense	Río Guarino Q. Santa Rita 1 Río Magdalena	
Transporte terrestre	Troncal del Magdalena	Sector: Viaducto Honda - Entrada Puente Puerto Salgar Marquetalia - Victoria	
	Secundarias	Norcasia - Dorada. Dorada - Victoria	
	Terciarias relevantes	Dorada - Buenavista San Miguel Vía Puente Colgante	
	Férrea	Tramo de: Dorada – Chiriguaná Balsillas-San Carlos	
	Líneas eléctricas	230k	San Carlos – Noroeste Dorada-Victoria
		115k	Dorada-Guaduro, Manzanares-Victoria
115k		Purnio - CHEC	
Subestación eléctrica	115k	Purnio - CHEC	

Unidades Hidrogeológicas

Según la zonificación propuesta por el (IDEAM, 2015), el acuífero pertenece a la provincia hidrogeológica PM1, Valle medio del Magdalena, asociado al sistema acuífero Mariquita - Dorada – Salgar. Este se constituye principalmente de detritos del Río Magdalena y sus afluentes, junto con sedimentos volcanoclásticos asociados a la Provincia Volcano Tectónica San Diego – Cerro Machín (PVTSC) (Martínez et al., 2014), y en menor proporción, rocas de la Formación Mesa y Formación San Antonio, del Grupo Honda (Abarca, 2021; Corpocaldas, 2018).

Teniendo como base propiedades hidráulicas y características geológicas de las unidades presentes en la extensión del acuífero. En el plan de manejo ambiental, Corpocaldas (2018) definiendo unidades hidrogeológicas (Figura 8):

Sistemas de acuíferos con baja a moderada productividad (A1)

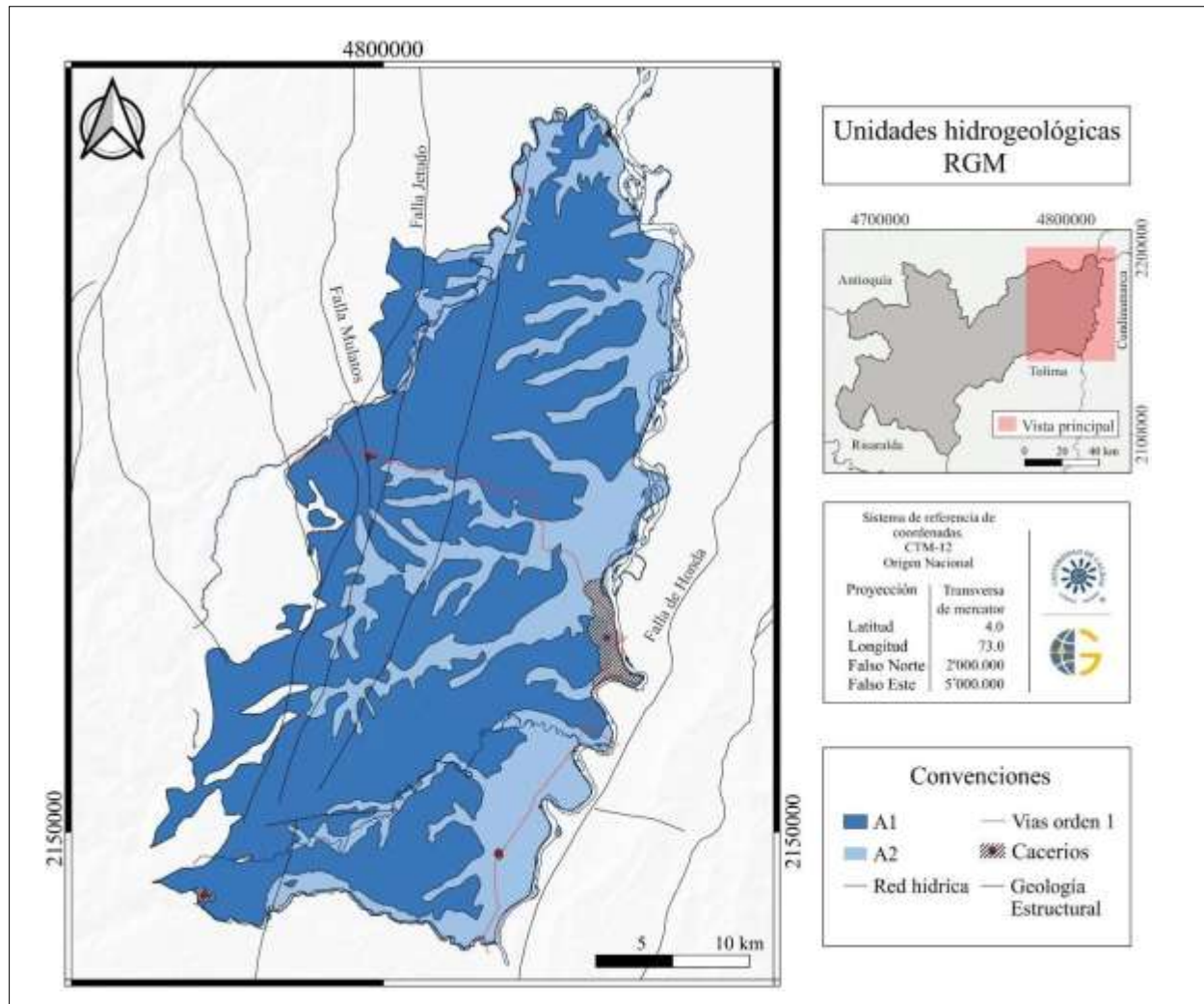
Representada por su bajo grado de consolidación y definida por depósitos cuaternarios, tanto aluviales como coluviales, asociadas al río Magdalena y sus tributarios (Guarínó, Purnio, La Miel). Dicha unidad enmarca acuíferos de tipo libre a confinados multicapa, cuyas variaciones laterales posibilitan localmente la presencia de semiconfinados.

Sistemas de acuíferos de baja a muy baja productividad (A2)

Definida principalmente en las formaciones Neógenas, las cuales desarrollan acuíferos libres a confinados. Grupo Honda (Mioceno), Formación Mesa (Plioceno) (Vinasco & Moreno, 2015). Su recarga está determinada por la precipitación en los puntos donde aflora (Abarca, 2021).

Figura 8

Unidades hidrogeológicas RGM.



Nota. Fuente. Corpocaldas (2018).

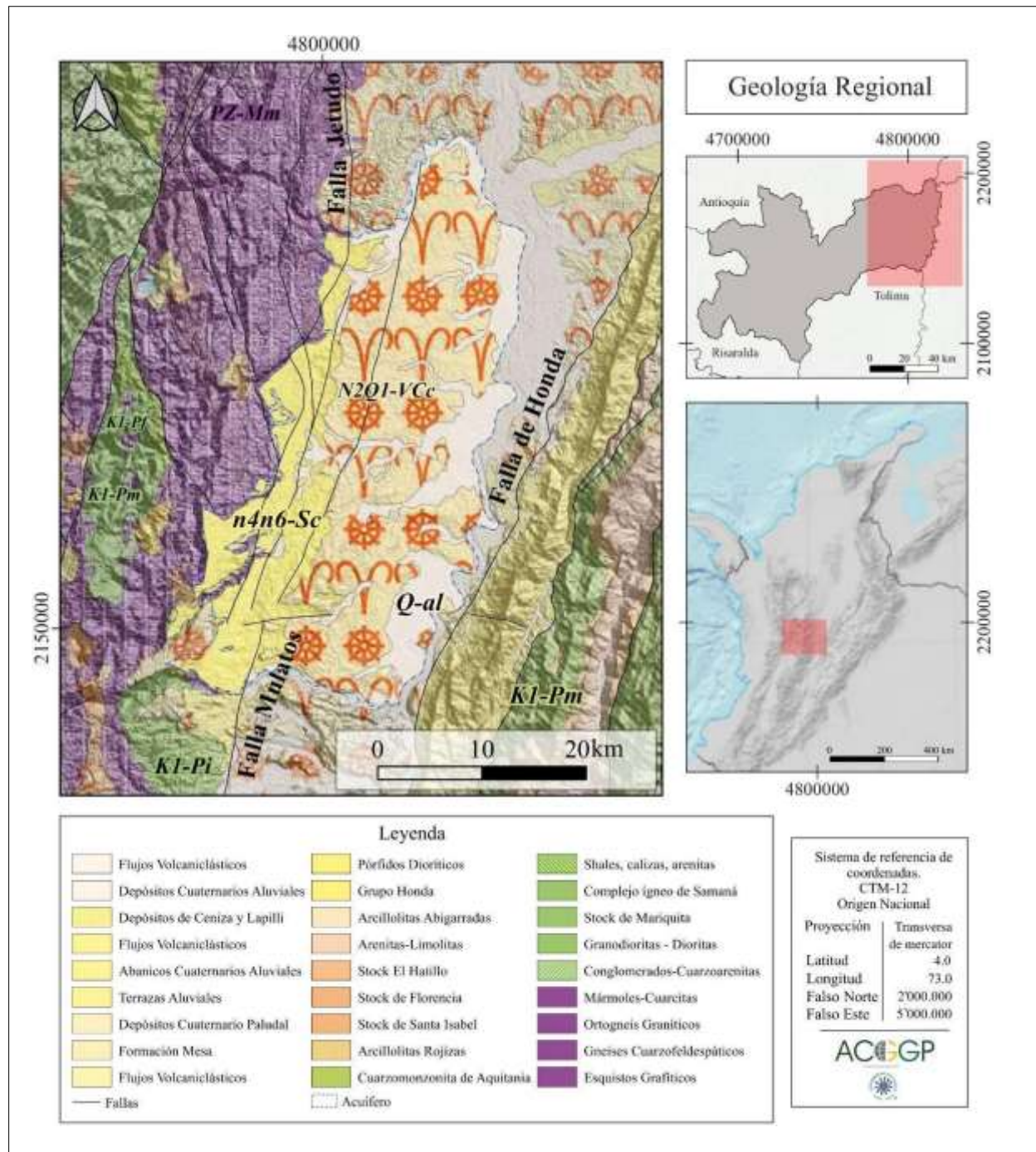
Geología

La zona de estudio, presenta basamento metamórfico del Complejo Cajamarca (Maya & Gonzalez, 1995), el cual está en discusión debido a la discrepancia de edades reportadas (J. J. Restrepo & Toussaint, 2020). Este se encuentra en contacto inconforme con el segmento superior del Grupo Honda (Tsh), Formación San Antonio, cuyo dominio de gravas polimícticas alternadas con bancos de arena, lutitas rojas y grises, de origen continental (Corpocaldas, 2018; De Porta, 1965). A su vez, Tsh está en contacto discordante con la Formación Mesa (Tsm) (Butler, 1942), caracterizada por la elevación topográfica de sus capas horizontales (lahares), con respecto a los depósitos aluviales recientes (Qal) del Río Magdalena y sus tributarios; los cuales, enmarcan la mayor extensión del acuífero, junto con depósitos piroclásticos y glaciofluviales (Qto) (Abarca, 2021; Corpocaldas, 2018; Inteinsa, 2018).

La geología estructural, no presenta expresión superficial (Abarca, 2021). Exhibe una tendencia N-S limitada al SE por la Falla Honda y al NW por las fallas de rumbo dextral, Mulatos y Jetudo, estas últimas, asociadas a el sistema transtensivo de la Falla Palestina, el cual controla la migración de norte a sur del vulcanismo adyacente de la cordillera central (Barrero & Vesga, 1976; Cardenas, 2004; Duque-Trujillo & Saldarriaga, 2020; Londoño & Castillo, 2011). Adicionalmente, Corpocaldas (2018) precisa lineamientos con tendencia NNE, al igual que POMCA río La Miel, define dos en el sector norte a partir de fotointerpretación (Corpocaldas & Cornare, 2016). Adicionalmente, el servicio geológico colombiano (SGC) en la plancha 188, al SW de La Dorada, fija un lineamiento adicional. De manera general se contemplan 3 geofomas: una de acumulación (aluvial) y dos de erosión (relieve colinado – relieve montañoso) (Abarca, 2021). La Figura 9 ilustra de manera general la geología regional y local del acuífero RGM.

Figura 9

Geología Regional.



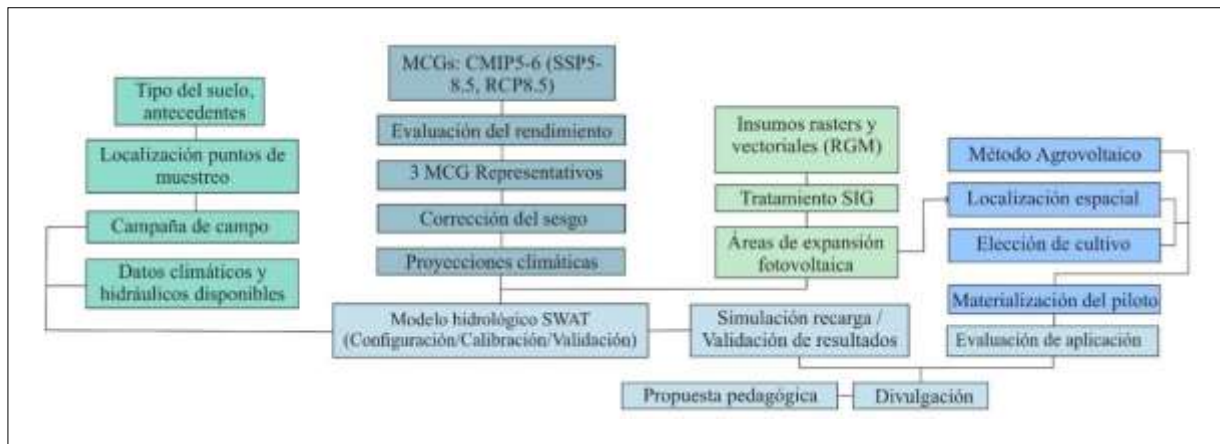
Nota. Adaptado de SGC, (2020).

Metodología

En la formulación del estudio se plantearon tres etapas, la primera, desarrollada en este escrito, integra la recolección y tratamiento de información secundaria, principalmente de tipo espacial. Para las dos etapas posteriores se limita a su planteamiento, el cual es susceptible a variar a medida que se avance en la comprensión del fenómeno, resolución de los datos y metodologías.

Por tanto, la generación de resultados se esbozó en parte de los insumos necesarios en la modelación hidrológica. Para esta se plantea el incorporar polígonos en los cuales varíen los valores de permeabilidad, por ello se demarcaron las áreas promisorias a albergar infraestructura fotovoltaica. De igual forma, con el fin de mejorar la calidad de los resultados obtenidos, se propone la medición de infiltración en 12 puntos, definiendo así su localización espacial. En cuanto a las variables climáticas necesarias, se limitó a enunciar la disponibilidad y respectivas fuentes de información.

De manera paralela, se formuló el método agrovoltaico como alternativa de aprovechamiento, para ello se determinó tanto la posible localización de un piloto, como la elección del cultivo. Además, en concordancia con los objetivos de la ACGGP, se enunció la articulación de la comunidad en la comprensión de los resultados y fenómenos de interés, esto mediante el desarrollo de encuentros pedagógicos, propuestos por Linda Cárdenas, coordinadora del programa de pedagogía regional. La Figura 10 ilustra de manera general los apartados metodológicos que se propusieron o se desarrollaron.

Figura 10*Ruta metodológica.*

Nota. Adaptada de Buhay Bucton et al. (2022).

Delimitación de las áreas óptimas de expansión fotovoltaica

Adaptando la metodología propuesta por Alhammad et al. (2022), se realizó el procesamiento de la información mediante el software ArcGIS 10.8. Con el uso de sus herramientas “Calculadora Ráster” y “Reclasificar”, se concibieron las zonas prometedoras a albergar infraestructura fotovoltaica en el área de estudio. La recopilación de los insumos para el procesamiento fue obtenida principalmente de fuentes cartográficas estatales y plataformas como solarGIS y Alaska Satellite Facility (ASF), consistiendo en archivos tipo ráster y shapefile. Dichos insumos se agruparon con base en tres criterios: económico, ambiental y climático; correspondiendo respectivamente a aquellos que hacen asequible su materialización, áreas de importancia ecológica y potencial de aprovechamiento fotovoltaico (PVOUT).

Tabla 2

Criterios, formato y fuentes de archivos geográficos.

Criterio	Subcriterio	Formato	Fuente	Resolución espacial
Económico	Carreteras	Vectorial	(INVIAS, s.f.)	N. A
	Vía férrea	Vectorial	(ANI, 2021)	N. A
	Líneas de tensión	Vectorial	(ISA & DNP, 2018)	N. A
	Pendiente	Ráster	(ALOS PALSAR ASF, 2022)	12.5m
Ambiental	Distritos Regionales de Manejo Integrado	Vectorial	(RUNAT, 2019)	N. A
	Humedales	Vectorial	(Corpocaldas, s.f.-b)	N. A
	Centros poblados	Vectorial	(SAS planet, s.f.)	N. A
	Fuentes abastecedoras departamentales	Vectorial	(Corpocaldas, s.f.-a.)	N. A
Climático	PVOUT	Ráster	(SolarGIS, 2022)	30 m

Nota. Fuente: Adaptada de Alhammad et al. (2022).

En relación con el ráster de PVOUT, para el municipio de La Dorada SolarGIS define los valores bajo un porcentaje de pérdidas de 11% (suciedad, sombreado, inversores, transformador, etc.), y un ángulo óptimo de inclinación de 20 grados (NREL, s.f.). Así pues, se precisó en 20Mw la capacidad de instalación en el recalcu de los valores, siendo esta la medida que separa los proyectos en pequeños y grandes, en función de la generación (Ong et al., 2013); junto con una inclinación de 10° (Altevogt, s.f.), y estructura fija (open rack). Bajo estos parámetros del ráster, al variar la inclinación y el porcentaje de pérdidas según información secundaria a 20%, la producción con respecto a la inicial presentó una disminución de alrededor de 33%, reclasificando así los pixeles con un 67% de su valor inicial. Posteriormente para definir los dos estados (0-1), al carecer de una medida que los discrimine, se optó por definir valores aptos a partir de 1080.5 (kWh/m²), valor mínimo observado en el área de influencia del proyecto parque solar fotovoltaico

Tepuy. Dicho resultado, para lograr una mayor resolución al momento de operarlo con los demás archivos ráster, fue interpolado por el método bicúbico en el entorno de Google Earth Engine (GEE) (Google Developers, s.f.-c).

Se plantearon dos delimitaciones. En primer lugar, se realizó con las entradas y ponderados planteados por Alhammad et al. (2022), variando en el método de obtención de los centros poblados, los cuales se digitalizaron a partir de imágenes satelitales del visor Bing provistas por SAS planet, (s.f.). En un segundo momento, debido al carácter del estudio y la disponibilidad de los datos, se determinó dentro de los tres criterios una nueva ponderación, haciendo hincapié en el ambiental, mediante el anexo de archivos espaciales de interés (Tabla 3).

Uyan, (2013), define la distancia a las áreas residenciales y de interés ambiental, en 500 metros; en semejanza se adoptó esta franja a los centros poblados, tanto cabeceras municipales como caseríos de escala considerable, incluyendo, además, los distritos de manejo integrado. El archivo de humedades, fijado a partir del plan básico de ordenamiento territorial 2016 (PBOT) (Corpocaldas, s.f.-b), delimita tanto los urbanos como los rurales, al igual que sus fajas, a partir de esta demarcación fue anexada una franja adicional de 100 m, la cual se mantuvo para las fuentes abastecedoras departamentales (FAD).

Por su parte, el segmento de la troncal y de la transversal fueron tomadas como primarias, fijando su área de influencia positiva en 1000m; cabe resaltar que su cercanía puede representar un aspecto negativo, para lo cual, se tienen antecedentes como la metodología de Noorollahi et al. (2016), la cual estipula 100 metros de franja como no óptimos. En cuanto a las vías secundarias y terciarias, se asignaron valores positivos a partir de su trazo, hasta los 500 metros y 250 metros, respectivamente; a excepción de la vía San Miguel - Buenavista - La Dorada, la cual, debido a su

relevancia, se trabajó como secundaria. Por su parte, para la vía férrea se precisó que la cercanía no representa un inconveniente, por ello se asignaron 250 metros, como el rango de influencia positiva. La distancia de influencia de la subestación El Purnio, se estimó teniendo en cuenta el radio que la separa de Tepuy.

Tabla 3

Ponderación de archivos geográficos.

Alhammad et al., (2022)							
criterios©	Subcriterios (Sc)		C%	Subcriterios	Sc%	Discriminante	
Económico	Distancia a las vías	10%	39%	Principales	3%	<1000 m	
				Secundarias	2%	<500 m	
				Terciarias		<250 m	
	Distancia a las líneas eléctricas	11%	39%	Vía férrea	3%	<250 m	
				Lineas de tension	4%	<1000 m	
				Subestación	4%	<3000 m	
Pendiente	3%		Distancia a centros poblados	10%	>500 m		
Ambiental	Distancia a áreas residenciales	21%	36%	Pendiente	4%	<5.71 (grados)	
				Distritos Regionales de Manejo Integrado	15%	>500 m	
				Fuentes abastecedoras departamentales	15%	>100 m	
climático	PVOUT	55%	25%	Humedales La Dorada	15%	>100 m	
				PVOUT	25%	>1080.5kWh/m ²	

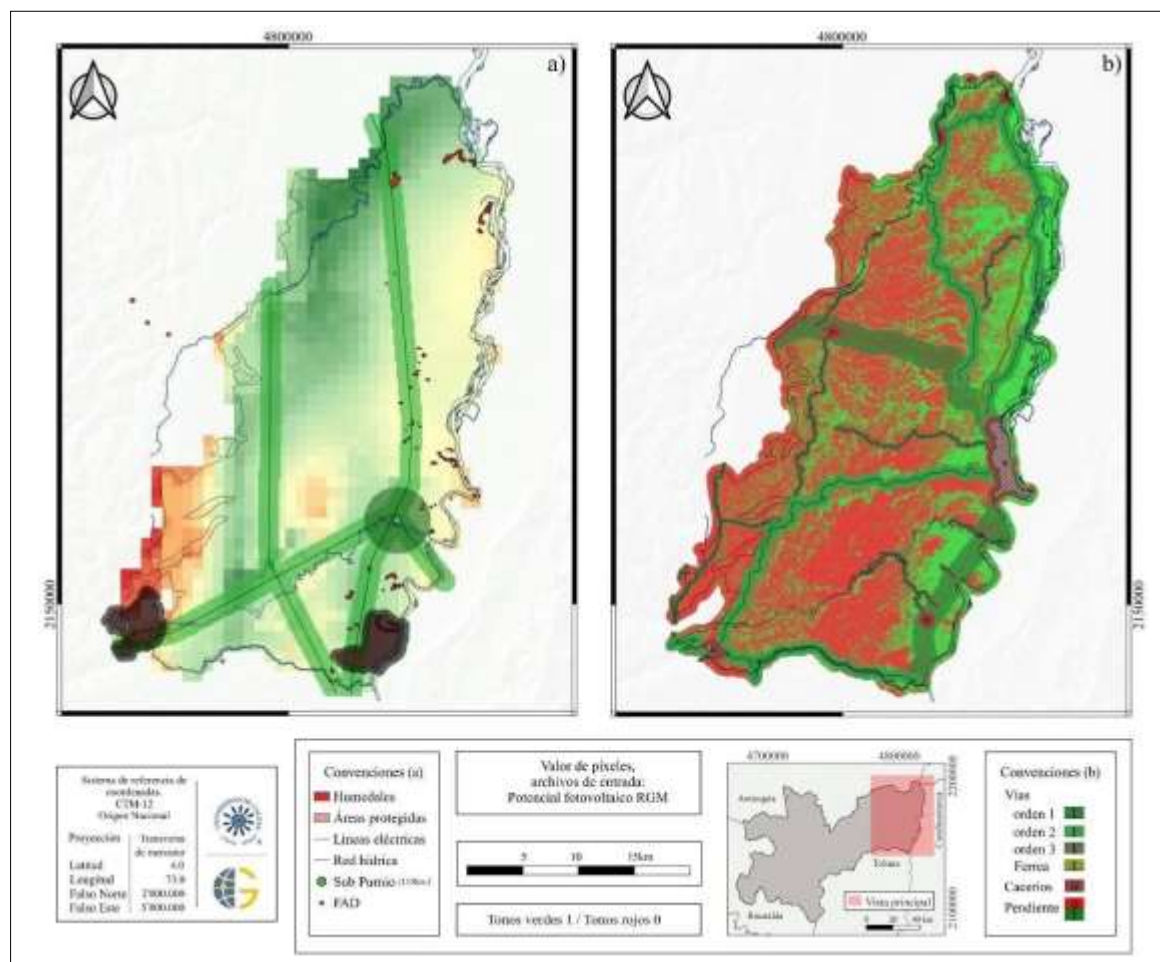
Nota. Las tres primeras columnas corresponden a la ponderación y los archivos de entrada propuesto por Alhammad et al. (2022); por su parte las siguientes columnas ilustran los archivos y valores propuestos en el presente documento. La última columna corresponde a la discriminante, el cual registra los valores a partir de los cuales se presenta una influencia positiva. Fuente: Adaptado de Alhammad et al., (2022).

La clasificación de pendientes se realizó a partir del análisis del modelo de elevación digital, con una resolución de 12,5 metros, obtenido del satélite AlosPalsar (ALOS PALSAR | ASF, 2022). Estas a su vez se discriminaron en dos clases, valores superiores a 5.71 grados e

inferiores a este, correspondiendo a “inclinado” según las clases de gradiente (FAO, 2009). Por su parte, a los archivos vectoriales se les determinó la distancia euclidiana, en función de su área de influencia, para posteriormente ser reclasificados en la obtención de resultados en valores binarios. Por último, estos valores fueron operados conforme a el porcentaje asignado, dando como resultado el espacio promisorio bajo cada una de las ponderaciones. Para el caso particular de la ponderación propuesta, dicho resultado fue compilado en 6 clases, siendo la “1” la que mayores valores representa. La Figura 11 ilustra los archivos ráster usados como insumos en la delimitación, a los tonos verdes se les asignó un peso de uno, y a los rojos de cero.

Figura 11

Entradas ráster, evaluación de zonas optimas de expansión fotovoltaica.



Adquisición de datos en campo

La toma de datos de campo se propuso con el objetivo nutrir el modelo, aumentar la resolución espacial y disminuir la incertidumbre en las simulaciones, mediante una calibración adecuada. En el área del acuífero se fijó un total de 12 puntos de muestreo de infiltración (infiltrómetro portátil – anillo doble). La ubicación de los puntos de medición se determinó en función principalmente de los tipos de suelo reportados por el IGAC (2010), para ello, se generaron 5 puntos aleatorios por unidad cartográfica. Posteriormente, fue seleccionado un punto por unidad, teniendo en cuenta su confluencia con los mayores valores de PVOOUT, junto con la distribución espacial de los cinco ensayos de anillo doble realizados por la corporación en el año 2018 (Corpocaldas, 2018).

Debido a su considerable extensión, en las unidades Asociación La Gloria–Guarino y Asociación Honda–Guayacan, se seleccionaron dos puntos por cada una; así mismo, se excluyeron del muestreo aquellas unidades que tanto su potencial como extensión, no era significativa.

Modelación hidrológica

En su desarrollo se propuso la adopción de la metodología de Buhay Bucton et al. (2022), con un enfoque en la afectación del agua subterránea debido variaciones de infiltración, en este caso, asociados a cambios de coberturas producto de la expansión de proyectos de generación fotovoltaica. Para la configuración del modelo hidrológico del acuífero mediante SWAT, se requieren datos climáticos, principalmente de precipitación y temperatura observadas; esto junto con propiedades hidráulicas y edáficas. Así pues, se enuncia una revisión de las posibles fuentes de información.

La red estratégica de monitoreo del acuífero acoge 269 puntos de agua subterránea (PAS), de los cuales 23 registran niveles piezométricos. Estos se localizan 12 en Qal y 11 Tsm, siendo así; 14 pozos, 8 aljibes y 1 piezómetro, con una densidad de 1 punto por cada 37,09 km² (Corpocaldas, 2018). Se dispone de datos de caudal y conductividad hidráulica, indexados en el MHC y PMAA del acuífero (Abarca, 2021; Corpocaldas, 2018). En cuanto al uso y tipo de suelo, Corpocaldas cuenta con información cartográfica; además se dispone en la plataforma GEE con una resolución de 10 metros, una clasificación de coberturas (Google Developers, s.f.-a).

En cuanto a los demás datos de entrada necesarios para la calibración, se encuentra información disponible a partir de red nacional del IDEAM, las corporaciones autónomas regionales (Corpocaldas, CAR, Cornare, Cortolima) y centros regionales, tales como el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC) y el Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia (SAMA)(CDIAC, s.f.; UdeA & DAGRAN, 2022). Se sugirió la selección de estaciones en un radio de influencia de 50km, con centro en el casco urbano de La Dorada.

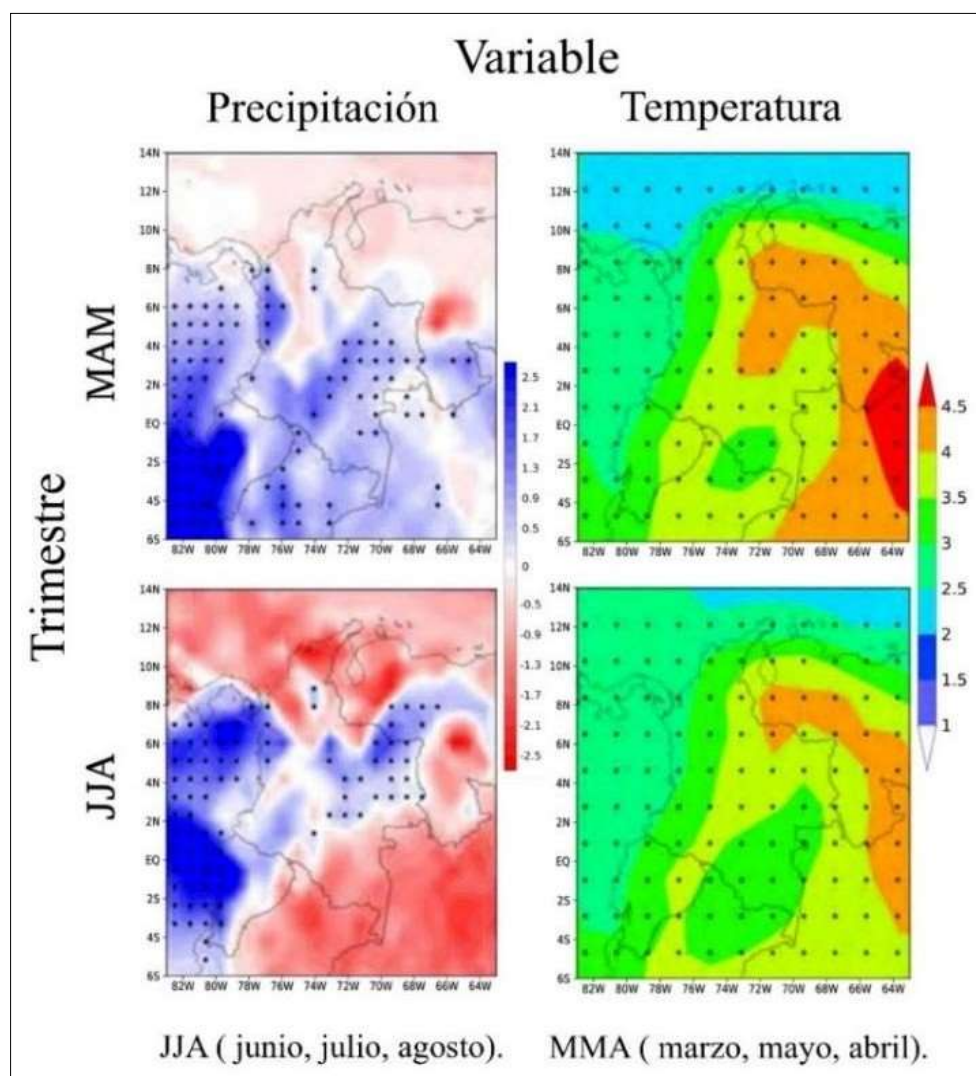
A su vez se GEE alberga valores asociados a evapotranspiración obtenidos de Penman-Monteith-Leuning Evapotranspiration V2 (PML_V2), los cuales presentan una resolución espacial de 500 metros y 8 días, para el período 2000-2020 (Google Developers, s.f.-b). Mas aún, se dispone de los antecedentes de validación usados por la tercera CNCC, los cuales comprenden el período de 1976-2005; junto con datos obtenidos mediante el visor de Engine, de set de datos como NEX-GDDP, en concordancia con la metodología desarrollada por Perlaza (2022).

En relación con los MCG, estos fueron seleccionados bajo el escenario de mayores emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5 - SSP8.5). Arias et al. (2021.-b) determina que a nivel nacional los modelos CMIP6 son más acordes en la representación de la precipitación, mientras que los CMIP5 presentan menor sesgo en cuanto a temperatura, la Figura 12 ilustra de manera general, los cambios proyectados a nivel nacional en cada una de las variables, dando uso al mejor conjunto de datos del CMIP6. En concordancia, los MCG fueron seleccionados según

el criterio de Arias et al. (2021.-b), siendo tratados por el Experimento Regional Coordinado de Reducción de Escala (CORDEX), cuyas simulaciones para el país, alcanzan una resolución horizontal de 50km (Cordex, s.f.), logrando así, una notable reducción de escala; la cual sigue siendo notoriamente amplia para la zona de estudio.

Figura 12

Cambios proyectados de precipitación y temperatura, mejor conjunto CMIP6, Colombia.



Nota. Los valores de precipitación están dados en mm/día y los de temperatura de la superficie del aire en °C, estos son calculados como la diferencia entre la proyección media de SSP5-8.5 para finales del siglo XXI (2071-2100) y la simulación histórica media (1971-2000). Fuente. Arias et al., (2021.-b).

Debido a que a la fecha se carece de estudios a nivel regional del sexto reporte, que evalúen el rendimiento de los MCG, con relación a CORDEX; en la elección, para la precipitación, se seleccionaron tanto de esta, como de la anterior. Los modelos sugeridos corresponden a SAM0-UNICON, GFDL-CM4, CNRM-CM6-1, CMCC-CMS, MIROC5, CNRM-CM5 (Arias et al., 2021.-b; Bonilla-Ovallos & Mesa, 2017; Di Virgilio et al., 2022).

Siguiendo la metodología de Buhay Bucton et al. (2022), cada uno de estos se somete a una evaluación de rendimiento mediante el método de entropía y la técnica de promedio ponderado, seleccionando los 3 modelos que mejor se ajustan a los datos, para la posterior corrección lineal de los sesgos (Shrestha et al., 2017). El uso de datos obtenidos de las proyecciones climáticas se enmarca para un periodo de 30 años (2024 – 2054), bajo el fundamento de que es el tiempo estipulado de operación de los proyectos en la zona (SAG & EPM, 2020a).

Evaluación de aplicación (Agrovoltaica)

Con el propósito de generar un aumento de la producción agrícola en áreas desprovistas, al tiempo que se aprovecha el potencial fotovoltaico con el menor impacto posible, se propone la aplicación del método agrovoltaico. Esta integración genera una disminución en la primera etapa de crecimiento, como consecuencia de la disminución de luz incidente, lo cual, en etapas posteriores de desarrollo vegetativo, no presenta variaciones significativas (Marrou et al., 2013). Así mismo, en temporadas cálidas supone una barrera de protección para los cultivos. Además, tiene el potencial de mejorar las condiciones socioeconómicas de la población rural, junto con un incremento en la electrificación de sus territorios (Ravi et al., 2016).

En la estimación de su viabilidad, se manifiesta el realizar ensayos de evapotranspiración e infiltración, tanto en la etapa previa como en el período de cosecha del cultivo, registrando así

los cambios edáficos de interés; de igual manera se pretende evaluar su factibilidad en aspectos sociales y económicos. Para la elección del cultivo se consideraron variables tales como el tipo de suelo, altura media, temperatura, altura sobre el nivel del mar, requerimiento hídrico y profundidad radicular (Tabla 4); de igual manera aspectos alusivos a su manejo, insumos, rentabilidad y comercio.

Las características del piloto establecen una capacidad instalada de 5.4 kW, con un porcentaje de pérdidas de 20% y una inclinación óptima de 10 grados, generando así 7.410 kWh/año (NREL, s.f.). Generalmente dicha inclinación es remitida a cero, lo cual no representa una disminución apreciable en los valores de producción. A pesar de que el tamaño del sistema fotovoltaico disminuye con respecto al evaluado en las áreas óptimas de expansión, el porcentaje de cambio en el ráster PVOOUT se mantiene cercano a 33%, lo cual hizo que se mantuviese fijo el insumo generado en dicho ítem, determinando así la localización espacial.

Tabla 4*Matriz de cultivos. Agrovoltaica.*

Cultivo	Altitud (msnm)	Temperatura °C	Req. Hídrico (mm)	Brillo solar (h)	Profundidad radicular (m)	Altura Max (m)	Tipo de suelo	Referencias
Arroz	0 - 1500	30-42	800-1240	10	0.55 - 0.655	0.4-1	Franco arcilloso-limoso	Alvarez, (2017); Mishra et al., (1997); USA Rice Federation, (s.f.)
Berenjena	0 - 1200	21-32	625-841	10-12	60.96	2-3	Arenoso	C. Sánchez et al., (2004); Wikifarmer, (s.f.)
Borojó	0-800	28	3000-4000	1500 (año)	N/A	3-5	Arenoso-margoso-arcilloso	Cuatrec., (s.f.)
Cebolla cabezona	0-3000	18-22	700	10-12	0.1524	0.8-1.5	Franco arenoso	Cristancho et al., (1990); Giraldo & Sandoval, (1996)
Cítrico	0-1500	18-25	889-1219	1500 (año)	5.4864	3	N/A	Intagri, (s.f.)
Frijol	0-4000	13-28	100	6	0.6096	0.5-1.70	Franco arenoso	Leguizamón et al., (2018)
Guayaba	0-1800	18-28	1000-2000	6-8	60.96	3-10	Franco arenoso-arcilloso	Arevalo et al., (2012)
Lechuga	0-2600	14-18	339	4-5	0.1524	1.5-2	Rico en materia orgánica	Acar, (2020); Infoagro., (s.f.)
Maíz	0-3000	13-29	600-800	1000-1500 (4m)	0,6096	1.5-3.5	Franco	M. Sánchez, (s.f.)
Maracuyá	0-1200	24-28	1.35- 2.3	1500 (año)	N/A	Enredadera	Bien drenado	Dorado et al., (2013); Jaramillo et al., (2009)
Melón	0-1000	23-30	400	6-8	0,6096	Enredadera	Franco-arcilloso	Baquero et al., (2017)
Papa China	0-100	28-32	2000	6-8	0,4572	1-2	Arcilloso	Sinisterra & Orozco, (2014); Villamil, (2013)
Sorgo	0-1500	18_20	450-500	6-8	2,4	1-1.8	Arenoso	Agrosavia, (2010); Lamb et al., (2022)
Soya	0-2000	22-30	450-700	6-8	0,6	1	Franco	Ruiz et al., (2013); Willis, (2008)

Tabaco	0-1800	10-35	500 - 1000	6-8	0.4572 - 1.524	2	Franco	De Roo, (1957); Finagro, (s.f.); Ruiz et al., (2013); Secretaría de agricultura y pesca, (s.f.)
Tomate	0-1800	15-25	1500-2000	N/A	0.6096	0.9-2	Franco arcilloso	Ruiz et al., (2013); Salazar, (2019)
Uva Chinche	0-2000	18-27	300- 600	6-8	1	Enredadera	Franco arenoso	Agrobit, (s.f.); Almanza, (2011); Hunter et al., (2016)
Yuca	0-2000	15-29	750-1000	10-12	0.5	3 Max	Franco/Franco arenoso	Ruiz et al., (2013); Silva, (s.f.)
Ahuyama	0-1500	20-28	350-450	6-8	0.6 - 1.8	Rastrera	Rico en materia orgánica	Correa et al., (2019)
Luffa - Estropajo	0-300	22-28	1100	1800 (año)	N/A	Enredadera	Franco arenoso	Secretaría de agricultura y pesca, (s.f.)
Aloe Vera	0-1500	18-40	N/A	6	0.5 - 0.6	0.8	Franco, Arenoso	Arancibia et al., (s.f.); Moreno et al., (2012)
Fique	1000-2000	18-24	1300	5-6	N/A	2-7	Sílico-arcillosos	Duque & Mejia, (2011); Finagro, s.f.; Porras et al., (2019)

Nota. El requerimiento hídrico está estimado en términos del tipo de cultivo, si este es transitorio, corresponde a la cantidad requerida en el ciclo productivo; si por el contrario es permanente, el valor registrado corresponde a su requerimiento anual. De igual manera, la información disponible del brillo solar requerido no es uniforme, por lo cual los valores expuestos corresponden a su requerimiento diario o anual, según cada uno de los casos; a excepción del maíz cuyo dato corresponde a su ciclo productivo. Las casillas marcadas con N/A reflejan la carencia del valor en la bibliografía disponible a la fecha.

Propuesta pedagógica ACGGP

Desde la asociación se planteó la divulgación de los resultados mediante 3 talleres pedagógicos, uno de ellos en la zona de influencia del piloto, y los dos restantes en el casco urbano del municipio, estos grosso modo se desarrollan en tres etapas: contextualización, didáctico, participativo. Estrategia metodológica:

Para iniciar se presenta en planearía el objetivo de la jornada, quienes la lideran, y a partir de preguntas orientadoras se expone el concepto de energía, presentando varios ejemplos de los tipos de energía que existen, describiendo, además, el ciclo hidrológico y las aguas subterráneas. Seguidamente los participantes se dividen en 2 grupos, uno para cada stand. (20 min)

Grupo No 1 – Recursos energéticos – Energías.

En este stand las personas reconocen y diferencian los recursos energéticos y tipos de energía existentes, renovables y no renovables, junto con su uso principal. Se hace énfasis tanto en el aprovechamiento de la energía solar, como en los recursos no renovables. Al finalizar, el grupo pasa al siguiente stand. (30 min)

Grupo No 2 – Acuífero RGM - Proyectos fotovoltaicos.

En este stand las personas tienen una descripción general del acuífero Río Grande de La Magdalena, al igual que un acercamiento al crecimiento de la energía fotovoltaica tanto en el país como en la región (descripción de proyectos existentes) y su relación con los ODS. Por último, se ahonda en el potencial del municipio para albergar futuros proyectos fotovoltaicos. (31 min)

Una vez los participantes han pasado por cada uno de los stands, se finaliza el taller con la presentación de los posibles impactos en el acuífero debido a cambios climáticos y edáficos, haciendo énfasis en la recarga y la calidad del agua. Por último, de manera participativa se exponen las posibles soluciones a dicha afectación junto con alternativas de aprovechamiento. (32 min)

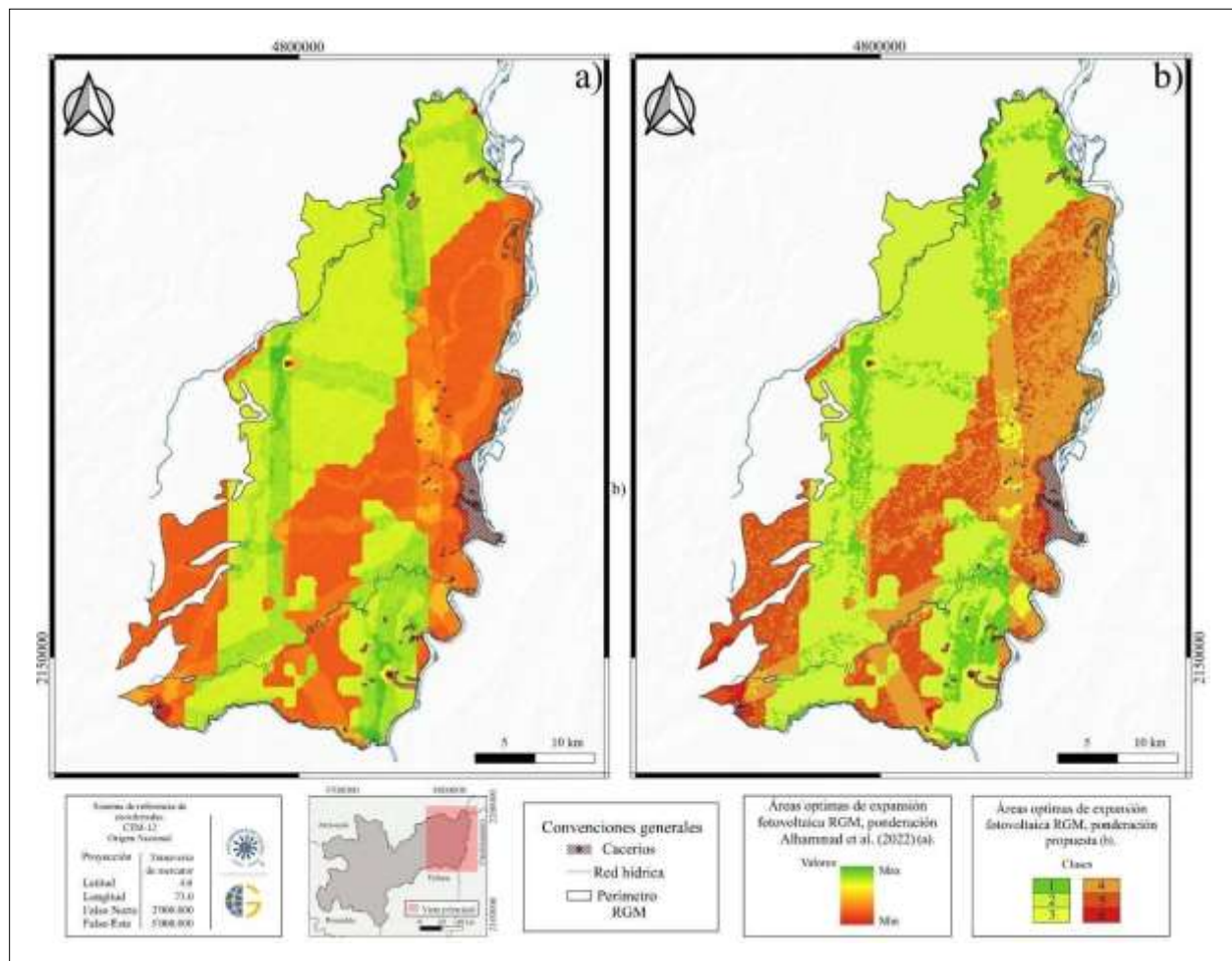
Resultados parciales

Áreas óptimas de expansión

Teniendo en cuenta el potencial de aprovechamiento, la Figura 12 ilustra en tonos verdes las áreas en las cuales es probable una variación en la infiltración. Para la visualización, los valores obtenidos fueron clasificados en 6 rangos, siendo 1 muy alto y 6 muy bajo. Debido a la resolución de los datos vectoriales anexados a la ponderación, al igual que la entrada de mayor peso es la de PVOUT, las zonas óptimas de expansión de los dos casos guardan una relación espacial considerable.

Figura 13

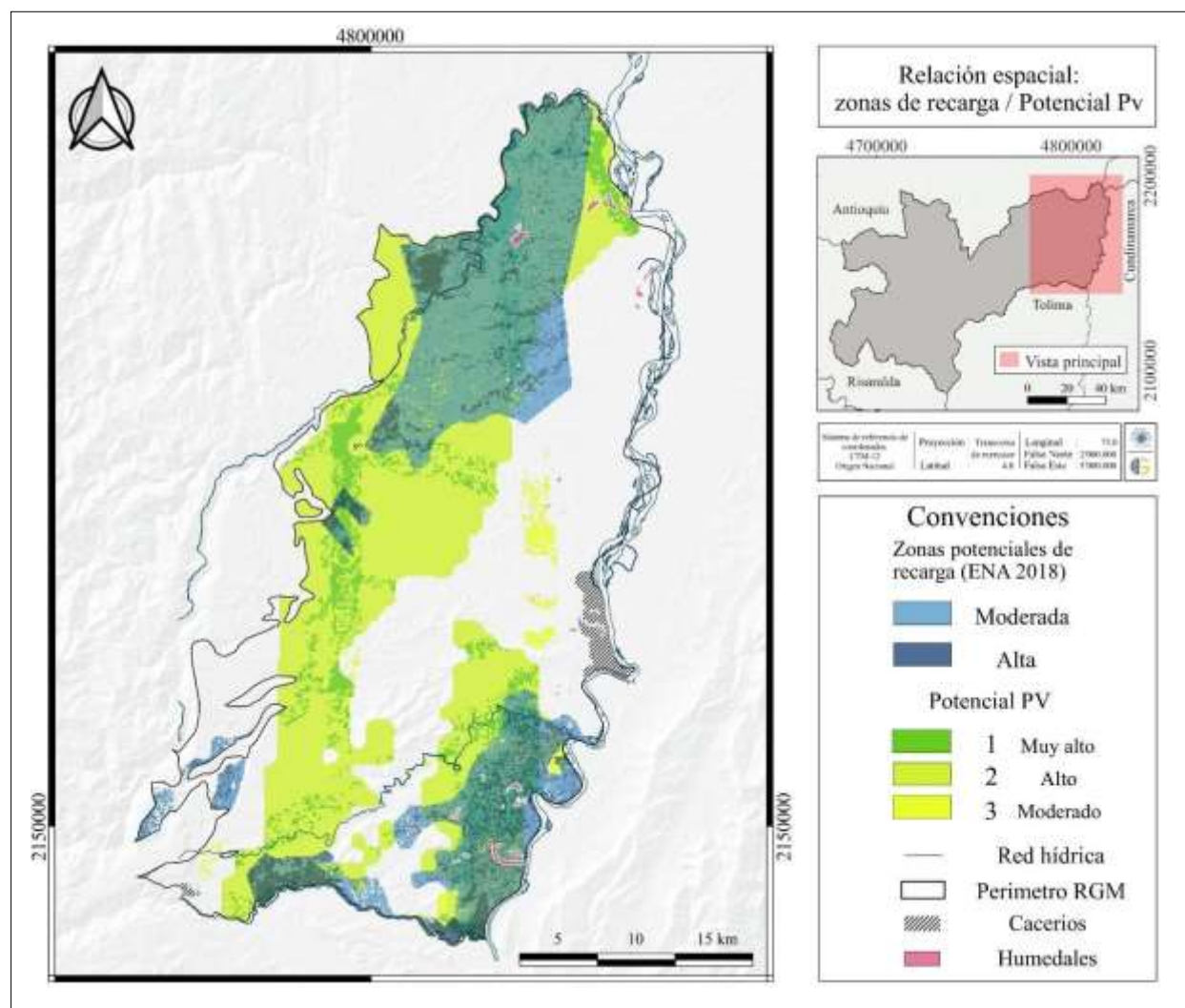
Áreas con potencial fotovoltaico, resultado ráster obtenido.



Por su parte, la Figura 14 contrasta la relación espacial entre las áreas con potencial fotovoltaico del acuífero, con el ráster de zonas potenciales de recarga generado por el IDEAM bajo el marco de ENA (2018). Para este se tuvieron en cuenta los valores más elevados reportados en los dos insumos.

Figura 14

Correlación espacial; áreas con potencial fotovoltaico, zonas potenciales de recarga. (RGM).



Puntos de muestreo de infiltración.

En la Figura 15 se observa la localización de los puntos de medición en las respectivas unidades de tipos de suelo, las cuales corresponden a aquellas reportados por el IGAC (2010), alojadas en el visor cartográfico de la corporación autónoma regional de Caldas.

Figura 15

Puntos de muestreo de infiltración propuestos.

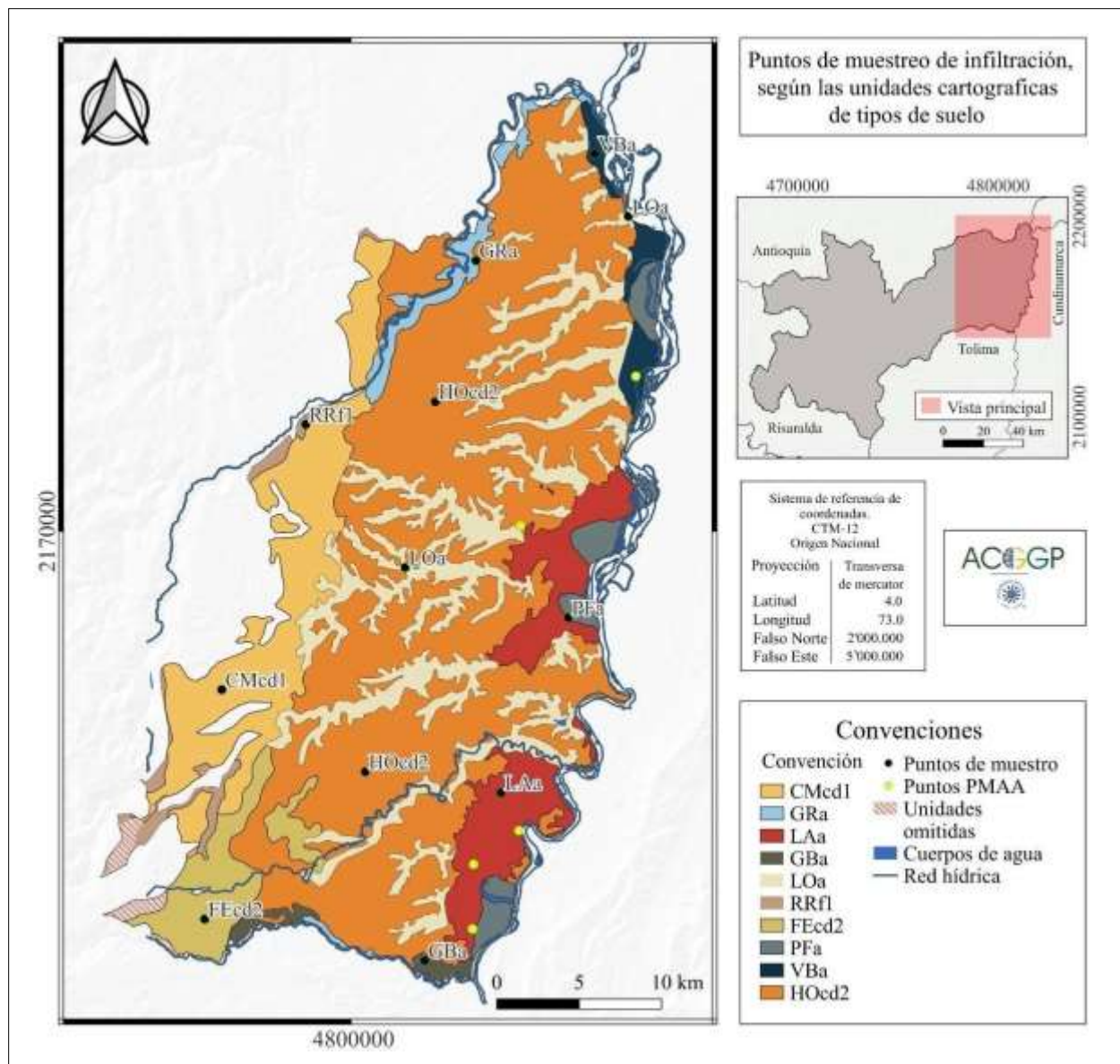


Tabla 5*Características de los puntos de muestreo.*

Tipo de suelo - Unidad	Convención	Textura	Condición de drenaje	CTM-12	
				x	y
Consociación Vistabuena	VBa	Texturas arcillosas	Imperfectamente drenados	4814783,297	2192910,921
Asociación San Felipe - Victoria	FEcd2	Texturas variables	Bien drenados	4791124,156	2146467,163
Asociación Río Moro - Río La Miel	RRf1	Texturas medias a moderadamente finas	Bien drenados	4797259,688	2176492,55
Asociación La Gloria - Guarino	LOa	Texturas franco- arcillosas a franco arenosas	Bien a imperfectamente drenados	4803304,068	2167813,505
Asociación La Gloria - Guarino	LOa	Texturas franco- arcillosas a franco arenosas	Bien a imperfectamente drenados	4816838,376	2189120,046
Asociación Honda - Guayacan	HOcd2	Texturas franco- arenosas a franco arcillo arenosas	Bien a excesivamente drenados	4800873,395	2155404,139
Asociación Honda - Guayacan	HOcd2	Texturas franco- arenosas a franco arcillo arenosas	Bien a excesivamente drenados	4805119,564	2177862,158
Asociación Guayabo - Potosi	GBa	Texturas arenosas a arenoso francas	Bien drenados	4804484,632	2143939,823
Asociación Gurinocito - Doña Juana	LAA	Texturas variables	Moderadamente bien drenados	4809104,097	2154134,454
Asociación Guarino - Samaná	GRa	Texturas variables	Moderadamente bien drenados, inundables	4807585,572	2186431,444
Asociación Cerro Gordo - Medina	CMcd1	Texturas francas a franco arcillosas	Bien drenados	4792159,162	2160389,672
Complejo Plata - Fermin	PFa	Texturas variables	Moderadamente bien a imperfectamente drenados	4813191,942	2164763,375

Nota. Adicionalmente a estos puntos, se tendrá en cuenta la toma de datos en la localización del piloto AGV.

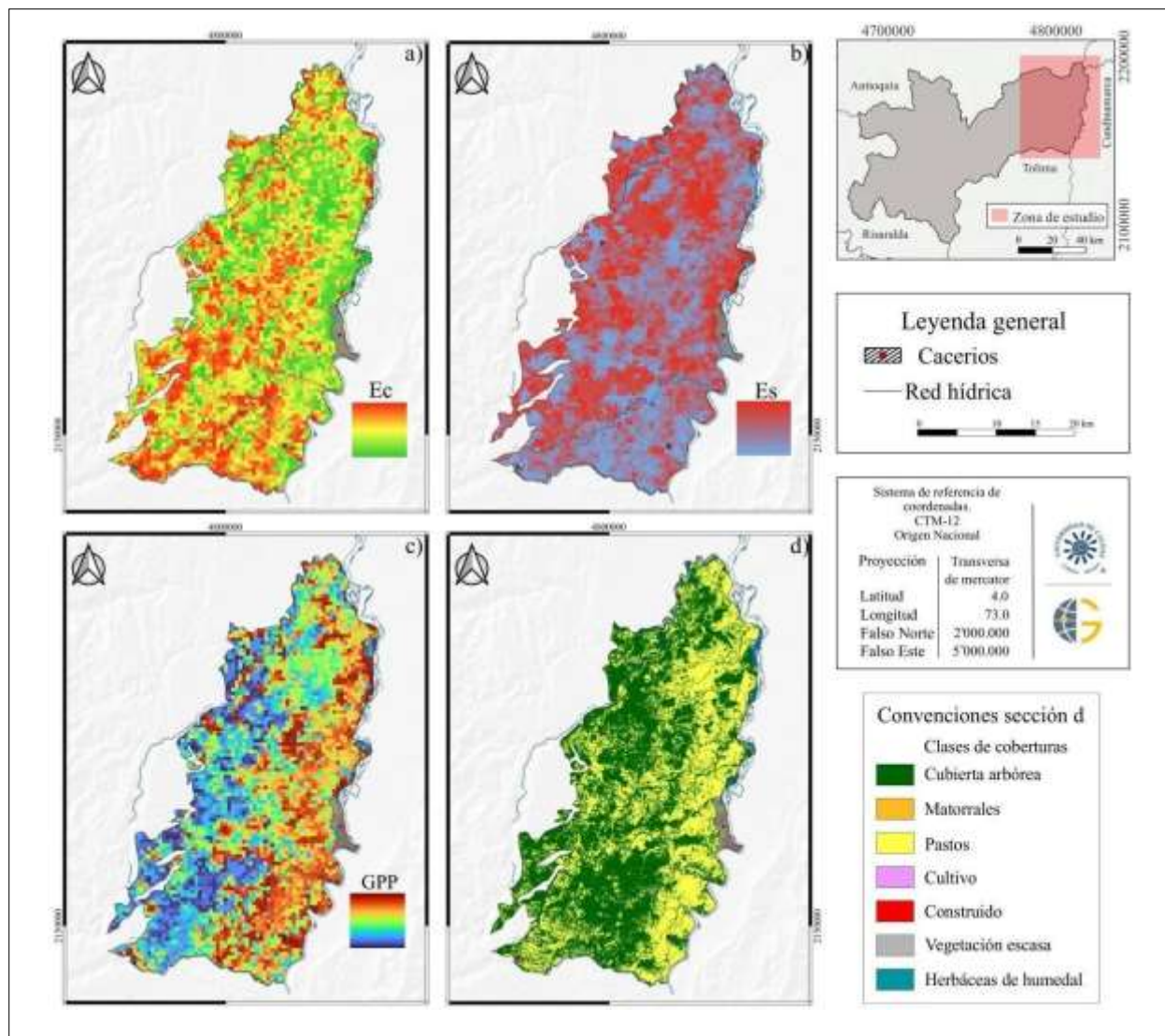
Visualización de coberturas y variación espacial de variables edáficas.

En la presentación del estado de las variables y con el fin de ilustrar los cambios mencionados en la bibliografía, se presenta una visualización de los aspectos de interés tales como las coberturas presentes en el acuífero RGM, y valores medios asociados a evapotranspiración (Figura 16). Para la visualización de los píxeles que han sufrido cambios notables en sus valores y sus componentes, se da uso a los datos proporcionados por PML_V2.

En la representación de manera espacial, la información disponible (2000-2020) se dividió de manera arbitraria en dos rangos (2000-2010), (2010-2020); posteriormente en cada intervalo, se obtuvo el valor medio del píxel del conjunto total de imágenes. Dicho resultado fue operado mediante la sustracción del segundo período con el primero, para así ser presentada de manera ilustrativa, asignando una rampa de color a cada variable evaluada. Como es de esperarse, las mayores variaciones son registradas al margen del trazo del río Magdalena; en estas áreas es notoriamente apreciable la disminución de la transpiración vegetal y el aumento de temperatura. Además, dichos píxeles coinciden en gran medida con las zonas óptimas de aprovechamiento fotovoltaico.

Figura 16

Visualización de datos asociados a evapotranspiración RGM.



Nota. a) Coberturas ESA (10m). b) Productividad primaria bruta (GPP). c) Evaporación del suelo (Es). d) Transpiración vegetal (Ec). Fuente. Adaptado de Google Developers., (s.f.-b).

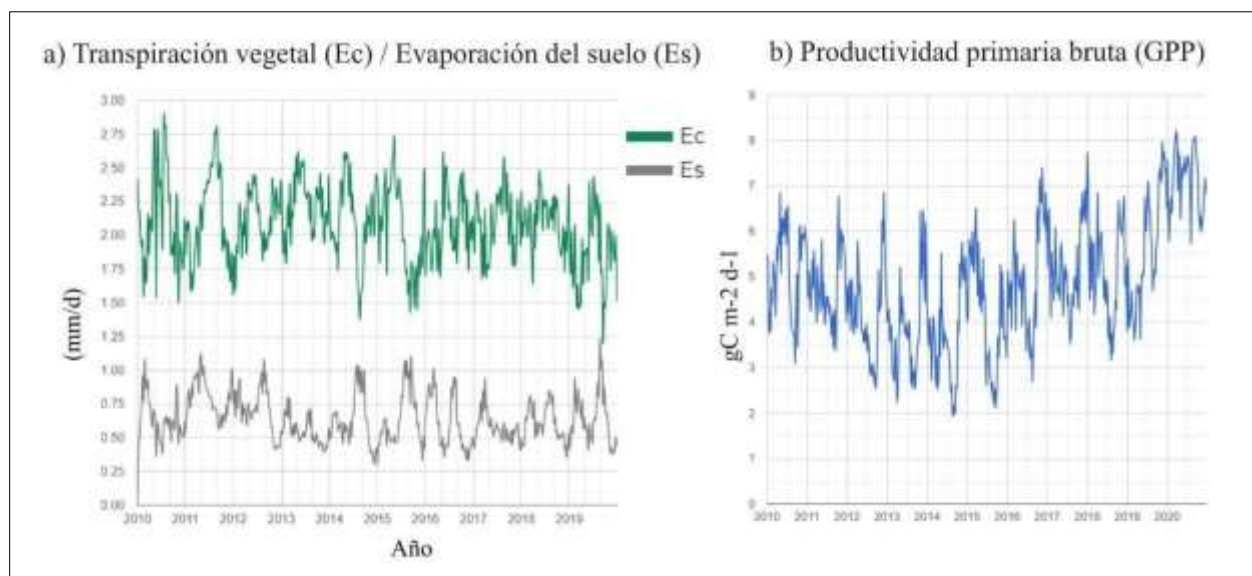
Adicionalmente, con el fin de presentar dicha variación en el tiempo, se realiza un contraste de las variables Ec (transpiración vegetal) y Es (evaporación del suelo), mediante un gráfico lineal comparativo generado en GEE (Figura 17). Así pues, la banda que evalúa la transpiración vegetal (Ec), refleja una tendencia decreciente para el período 2010-2020, alcanzando su valor mínimo de

1,55 mm/d, en septiembre de 2019. De igual manera, para el área que comprende el municipio de La Dorada, se presenta un aumento de la evapotranspiración y una disminución de la transpiración vegetal, con un mínimo en 1.34 mm/d (septiembre de 2019), siendo menor para dichos registros, en el sector oeste.

Debido a la discrepancia de valores, se ilustra de manera separada la variación en Gross primary product (GPP), la cual para el acuífero RGM muestra una tendencia positiva sobresaliente a partir de mediados de 2014; momento desde el cual es notable el incremento de los valores, siendo más representativo desde mayo de 2019, marcando un pico de 8.7 (gC m⁻² d⁻¹) a finales de marzo de 2020.

Figura 17

Gráfico lineal temporal. Comparativo Ec-Es, GPP.



Elección de cultivo – Aloe Vera (Sábila)

Teniendo en cuenta los parámetros enunciados en la Tabla 4, se optó por el cultivo de Aloe Vera, en concordancia con sus bajos requerimientos hídricos, uso eficiente del agua y óptimo desarrollo en zonas áridas, evidenciado en su alta producción de gel; además, a nivel superficial permite el aumento de la humedad, disminución de la temperatura y reducción de la erosión (Silva et al., 2010). De manera puntual, a nivel regional, se ha demostrado el impacto del cultivo de Aloe, en aspectos como; aumento de la humedad y fertilidad de los suelos, disminución de la erosión y temperatura (Jaramillo, 2014).

Sus condiciones edafoclimáticas son climas cálidos y secos, en un rango de alturas entre 0-1500 m.s.n.m. y temperaturas entre 18-40 °C, con preferencia de suelos francos y un óptimo desarrollo con un promedio de 06 horas diarias de luz solar directa (Pinedo, 2019; Moreno et al., 2012). Otro factor determinante es su altura media, aspecto que reduce el costo de la infraestructura asociada, la cual a su vez mitiga aspectos negativos, derivados del exceso de exposición solar directa.

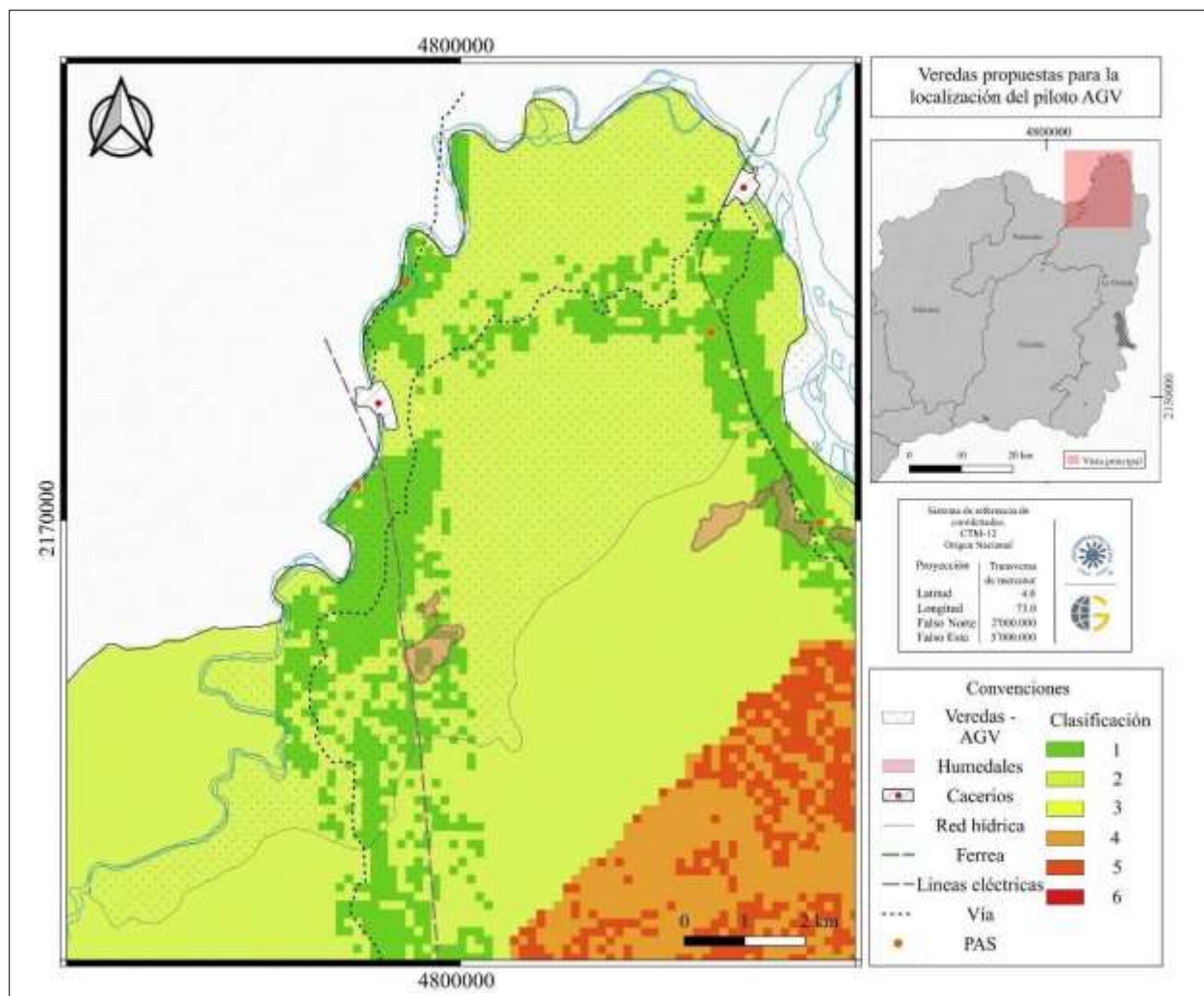
La instauración del piloto enmarca la siembra de 60 hijuelos en un área de 50m²a una profundidad de entre 20-50 cm, alcanzando un nivel radicular de 50-60cm, cuyo espaciado consta de 1m entre surcos y 0.8m entre plantas, lo cual favorece tanto su desarrollo como las labores de limpieza (Moreno et al., 2012). Se plantea el diseño de un sistema de riego, el cual emule el uso de las aguas lluvias recolectadas por los canales perimetrales, de la infraestructura fotovoltaica tradicional. Para evitar un sombreado excesivo, se tiene en cuenta la recomendación de Gorjian et al., (2020), el cual precisa en 2 metros de altura, la infraestructura fotovoltaica; esta se ancla con zapatas de concreto en 6 columnas a tierra, donde reposan 12 módulos solares de 450W (2.1x1.04m), agrupados en 3 filas de 4 paneles (De León, 2022).

Localización piloto agrovoltaico

En cuanto a su localización geográfica, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las áreas potenciales, y la importancia que supone el acuífero para la población rural de la zona norte (Corpocaldas, 2018); se propone la localización del piloto, al norte del municipio de La Dorada, dentro de las veredas Buenavista - La Atarraya (Figura 18).

Figura 18

Propuesta de área para la instauración del piloto agrovoltaico.



El polígono, además de sus óptimas condiciones, presenta una variación considerable en sus valores medios de evaporación del suelo, así mismo, su recarga potencial anual por precipitación se estima en el rango de 150-200mm, método Sehgal, y entre 800-900mm, método Turc (Corpocaldas, 2018). Dicha área presenta cercanía a PAS contenidos en la red primaria del acuífero. Dos pozos, “Vereda la atarraya” y “hacienda Santa Clara”, de los cuales se cuenta con información de niveles y calidad; por su parte, el aljibe más cercano corresponde a “Finca Santa Rita”.

Sus valores de PVOOUT neto rondan los 2075.72 - 2094.34 (kWh/m²), presenta cercanía a la línea eléctrica Balsillas - San Carlos (230Kw), y la vía San Miguel – Buenavista, así como al este, se encuentra el trazo de la vía férrea. Adicionalmente, la corporación cuenta con antecedentes de talleres participativos en la comunidad de esta área, los cuales evidencian una articulación efectiva de la población; favoreciendo la implementación de la etapa de divulgación.

ACGGP – Pedagogía y divulgación

En el marco de las labores asignadas dentro de la ACGGP, con miras a lograr un afianzamiento de habilidades en temas de divulgación académica, de manera paralela a la formulación del proyecto expuesto en el presente documento, se realizaron 5 boletines, en los cuales se resaltan aspectos de interés en el sector de los hidrocarburos, publicaciones de artículos de diversas áreas de la geología, junto con novedades asociadas a las labores llevadas a cabo por la asociación (ACGGP, 2022). Adicionalmente, la presente formulación fue sustentada ante la AAPG en su “Sustainable Development in Energy Competition”. De igual manera, se realizó una exposición a manera de ponencia, en la XV Semana Técnica de Geología, Ingeniería geológica y Geociencias.

Conclusiones

El lograr un acercamiento a la cuantificación de la variación de la recarga del acuífero, debida a proyectos fotovoltaicos; representa un importante insumo en planificación del aprovechamiento, el cual dependerá en gran medida de estudios venideros.

Debido a que el presente escrito se enmarcó en la generación de insumos y proposición metodológica, la disminución en la recarga se define a partir del análisis de información secundaria.

Sectores del acuífero que presentan estados óptimos de aprovechamiento fotovoltaico, tienen cierta correspondencia espacial con áreas de recarga por precipitación, de ahí la necesidad de una adecuada gestión de coberturas y zonas que requieren una planificación para su uso.

A medida que aumente la resolución de los datos, se podrán incluir en la determinación de las zonas óptimas de expansión fotovoltaica, archivos vectoriales de mayor escala, asociados principalmente a los afluentes e importancia ambiental.

La delimitación de las zonas óptimas puede variar en el mediano plazo, al depender de aspectos tales como el rango de potencial fotovoltaico sobre el cual se considere rentable su instauración, la infraestructura asociada y la escala de los proyectos; aspectos cambiantes en el desarrollo del aprovechamiento de la energía solar.

A nivel municipal, la propuesta agrovoltaje propicia el aprovechamiento agrícola de nuevos espacios, los cuales actualmente no son considerados debido al tipo de suelo, baja presencia de sombra y altas temperaturas.

La divulgación de los resultados representa un aporte al entendimiento del territorio por parte de la población Doradense, avanzando así, en la apropiación social del conocimiento geocientífico.

Recomendaciones

Avanzar en la materialización del proyecto, teniendo como base la formulación propuesta, o dado el caso, mediante la implementación de una metodología acorde a los objetivos de este.

Debido a la escala, se tiene un alto nivel de incertidumbre en los modelos y proyecciones. Se propone ampliar el área de estudio, a la provincia hidrogeológica del Valle Medio del Magdalena, la cual, fotovoltáicamente, es altamente prospectiva.

En los actuales proyectos fotovoltáicos, ahondar en el efecto de la erosión en la calidad del agua.

Articulación con el PMAA y el posterior POMCA de “Aferentes al Magdalena entre ríos Guarín y La Miel”.

Evaluar la correspondencia espacial del bosque seco tropical, con los resultados de potencial obtenidos, e incorporarlo a futuras ponderaciones. Esto debido a que representa un ecosistema estratégico con gran influencia en la zona de estudio.

Estimar la viabilidad a nivel edáfico en los proyectos existentes, de alternativas en la disminución de la erosión, aumento de infiltración y aprovechamiento del suelo. Se propone el establecimiento de fabáceas, gramíneas o sistemas silvopastoriles de especies menores.

Con el fin de nutrir los modelos, se formula la incorporación de los datos de variación del nivel freático obtenidos a partir de la red de monitoreo del acuífero.

Se propone una articulación de las CARs amparadas por el alto potencial fotovoltáico del valle del superior y medio del Magdalena, en la planificación acertada del territorio.

Incentivar la interacción de la Universidad de Caldas y Corpocaldas, mediante convenios con semilleros en la búsqueda del entendimiento de los sistemas acuíferos a nivel departamental.

Con el apoyo del centro regional de educación superior (UCaldas), proponer una oferta académica enfocada en energías renovables y recurso hídrico, con miras a lograr un aprovechamiento y comprensión de la capacidad con la que dispone La Dorada.

En un análisis integral del funcionamiento del acuífero, considerar los datos de sísmica 2D disponibles de la zona de estudio, alojados en el Banco De Información Petrolera (BIP).

Dar uso a aplicaciones como GQAnalyzer, en el análisis de la variación composicional de la química del agua, por parte de la red primaria del acuífero.

Planteamiento de acciones de manejo, cuidado y/o protección del paisaje en las áreas del municipio, donde se desarrollen proyectos de generación fotovoltaica; con el apoyo de actores como la Asociación de Jóvenes Emprendedores (PDPMC) y la Asociación de Mujeres Campesinas negras e indígenas de Colombia (ANMUCIC).

Tal como lo propone Bolaños-Chavarría et al.(2023), dar uso a los datos futuros de (GRACE-FO), en este caso particular, enfocados al análisis de las dinámicas del acuífero RGM, y la validación de las estimaciones obtenidas del presente estudio.

Con el fin de nutrir los modelos, se propone una caracterización isotópica de la recarga, la cual a su vez mejorará la comprensión de los efectos del cambio climático.

Referencias

- Abarca, R. M. (2021). Modelo hidrogeológico conceptual acuífero del río grande de la Magdalena. Corpocaldas, 2013–2015.
- Acar, B. (2020). Water-yield relationships of lettuce plants for different irrigation strategies. Mechanization In Agriculture & Conserving Of The Resources. <https://stumejournals.com/journals/am/2020/5/177.full.pdf>
- ACGGP. (2023). ACGGP. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos de La Energía. <https://www.acggp.org>
- Agrobit. (n.d.). Cultivo de Uva. Retrieved March 21, 2023, from <https://cutt.ly/5wrqUYPs>
- Agrosavia. (2010). El cultivo del Sorgo, historia e importancia. <https://cutt.ly/6wrqUKbA>
- Alhammad, A., Sun, Q., & Tao, Y. (2022). Optimal Solar Plant Site Identification Using GIS and Remote Sensing: Framework and Case Study. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 312, 15(1), 312. <https://doi.org/10.3390/EN15010312>
- Almanza, P. (2011). Determinación del crecimiento y desarrollo del fruto de vid (*Vitis vinifera* L.) bajo condiciones de clima frío tropical [Universidad Nacional de Colombia]. <https://cutt.ly/GwrqItEk>
- ALOS PALSAR | ASF. (2022). <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>
- Altevogt, J. (n.d.). Session 2a: Solar power spatial planning techniques. Renewables Academy (RENAC). Retrieved May 21, 2023, from <https://cutt.ly/NwrqIdur>
- Alvarez, I. (2017). Determinación de la Norma Total de Riego Neta en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) para 2 tipos de nivelación del suelo en el “Sur del Jíbaro” [Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]. <https://cutt.ly/jwrqIKSw>
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.03.081>

-
- ANI. (2021). Concesiones Férreas. <https://cutt.ly/Kwtg2vHo>
- ANLA. (2021). Resolución N° 01576.
- Arancibia, D., Talamilla, M., Miranda, M., & Prat, L. (n.d.). Aloe vera Manejo del cultivo y usos. Ministerio de Agricultura (Chile).
- Arango-Aramburo, S., Turner, S. W. D., Daenzer, K., Ríos-Ocampo, J. P., Hejazi, M. I., Kober, T., Álvarez-Espinosa, A. C., Romero-Otalora, G. D., & van der Zwaan, B. (2019). Climate impacts on hydropower in Colombia: A multi-model assessment of power sector adaptation pathways. *Energy Policy*, 128, 179–188. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.12.057>
- Arevalo, E., Díaz, A., Galindo, J., & Rivero, M. (2012). Manejo fitosanitario del cultivo de guayaba (*Psidium guajava*, L.) Medidas para la temporada invernal. ICA. <http://www.healthcareusp.com/10-healthy-fruits-and-vegetables-that-we-don-t-eat.html>
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., G. Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., D. Palmer, M., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., W. Thorne, P., & Trewin, B. (2021.-a). Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
- Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Sixth Assessment Report. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021.-b). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería*, 100, 75–96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Baquero, C., Arcila, Á., Arias, H., & Yacomelo, M. (2017). Modelo productivo del cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) para la región Caribe. *Agrosavia - Colección Transformación Del Agro*. <https://cutt.ly/ywrqOkEo>
- Barrero, D., & Vesga, C. J. (1976). Geología de la Plancha 188 La Dorada. Servicio Geológico

- Colombiano, 1.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024246/mapa/pdf/0101242461300008.pdf>
- Betancur-Vargas, T., García-Giraldo, D. A., Vélez-Duque, A. J., Gómez, A. M., Flórez-Ayala, C., Patiño, J., & Ortíz-Tamayo, J. Á. (2017, June 30). Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia.
<http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/33628>
- Bolaños-Chavarría, L., & Betancur Vargas, T. (2018). Estado del arte sobre el cambio climático y las aguas subterráneas. Ejemplos en Colombia. *Revista Politécnica*, 14(26), 52–64.
<https://doi.org/10.33571/RPOLITEC.V14N26A5>
- Bolaños-Chavarría, S., Betancur-Vargas, T., Salazar-Villegas, J. F., & Werner, M. (2023). Consideraciones sobre la oferta hídrica de los sistemas acuífero-humedal en la cuenca Magdalena-Cauca, Colombia, a partir de la interpretación de datos de los satélites GRACE. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1), 1–24. <https://doi.org/10.15359/RCA.57-1.6>
- Bolaños-Chavarría, S., Werner, M., Salazar, J. F., & Betancur, T. (2022). Benchmarking global hydrological and land surface models against GRACE in a medium-sized tropical basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(16), 4323–4344. <https://doi.org/10.5194/HESS-26-4323-2022>
- Bolaños, S., Salazar, J. F., Betancur, T., & Werner, M. (2020). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology*, 125687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125687>
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa, O. J. (2017). Validation of the precipitation estimated by CMIP5 climate models in Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107–118. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.427>
- Buhay Bucton, B. G., Shrestha, S., KC, S., Mohanasundaram, S., Viridis, S. G. P., & Chaowiwat, W. (2022). Impacts of climate and land use change on groundwater recharge under shared

-
- socioeconomic pathways: A case of Siem Reap, Cambodia. *Environmental Research*, 211, 113070. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.113070>
- Butler, J. W. (1942). Geology of Honda District, Colombia. *AAPG Bulletin*, 26(5), 793–837. <https://doi.org/10.1306/3D93346C-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Cardenas, P. (2004). Modelo y cartografía estructural del sistema de fallas de Palestina en sector del Parque Natural de Los Nevados. Universidad de Caldas.
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Gunn, E. L., Morgan, R., Mwanga, S., Supratid, S., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., ... Rama, B. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>
- CDIAC. (n.d.). Geoportal-SIMAC. Retrieved November 9, 2022, from <https://cdiac.manizales.unal.edu.co/geoportal-simac/>
- Chec. (n.d.). Purnio. Retrieved March 18, 2023, from <https://www.chec.com.co/institucional/proyectos/bioma/purnio>
- Clifton, C., Evans, R., Hayes, S., Hirji, R., Puz, G., & Pizarro, C. (2010). Water and Climate Change: impaCts on groundWater resourCes and adaptation options. *Water Working Notes*. <https://cutt.ly/5wrqOB2n>
- Corpocaldas. (2018). Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Rio Grande de la Magdalena.
- Corpocaldas. (n.d.-a). Fuentes Abastecedoras Departamentales. Retrieved March 20, 2022, from <http://190.0.61.202:8085/#/viewer?id=51>
- Corpocaldas. (n.d.-b). Plataforma Virtual SIG-SIR. Retrieved January 11, 2023, from <http://190.0.61.202:8085/#/home>

-
- Corpocaldas. (2019a). PGAR Plan de gestión ambiental regional 2020-2031. Anexo V, Recurso hídrico. Corpocaldas, 281–366. <https://doi.org/10.2307/j.ctvrzgz1.18>
- Corpocaldas. (2019b). PGAR Plan de gestión ambiental regional 2020-2031. Anexo X, Clima. <https://historico.corpocaldas.gov.co/publicaciones/329/10-14/TomoII/AnexoX-Clima.pdf>
- Corpocaldas, & Cornare. (2016, April 28). POMCA Río La Miel. https://www.corpocaldas.gov.co/PreviewContent/Index?pag_id=2277
- Correa, E., Yacomelo, M., León, R., Orozco, A., Silva, G., & Tamara, R. (2019). Modelo productivo de ahuyama para la región Caribe colombiana. Agrosavia. www.agrosavia.co
- Cristancho, V., Buitrago, A., & Corredor, L. (1990). El cultivo de la Cebolla Cabezona . SENA. <https://cutt.ly/KwrqSTUT>
- Cuatrec. (n.d.). Borojoa patinoi. Plants For A Future. Retrieved March 21, 2023, from <https://pfaf.org/user/Plant.aspx?LatinName=Borojoa+patinoi>
- Cusva, A. (2022). Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agricultoras de Colombia. Universidad de Los Andes.
- DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018>
- De León, F. (2022). Diseño de sistema agrofotovoltaico para mitigar las afectaciones a la recarga de un acuífero por sistemas fotovoltaicos tradicionales en La Dorada, Caldas. Unimagdalena, 1–28. <https://cutt.ly/mwrqSDtW>
- De Porta, J. (1965). La estratigrafía del Cretácico superior y Terciario en el extremo S del Valle Medio del Magdalena. In *Boletín de Geología* (Issue 19, p. 43).
- De Roo, H. (1957). Root Growth in connecticut Tobacco Soils. In Connecticut Experiment Station. <https://portal.ct.gov/-edia/CAES/DOCUMENTS/Publications/Bulletins/B608pdf.pdf>
- Di Virgilio, G., Ji, F., Tam, E., Nishant, N., Evans, J. P., Thomas, C., Riley, M. L., Beyer, K.,

-
- Grose, M. R., Narsey, S., & Delage, F. (2022). Selecting CMIP6 GCMs for CORDEX Dynamical Downscaling: Model Performance, Independence, and Climate Change Signals. *Earth's Future*, 10(4). <https://doi.org/10.1029/2021EF002625>
- Diez, C., Girling, B., Rogner, M., Samuel, D., Troja, N., & Ubierna, M. (2018). Hydropower status report 2018, sector trends and insights. https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/iha_2018_hydropower_status_report_4.pdf
- DNP. (n.d.). Visualización datos - SISBÉN IV. Departamento Nacional de Planeación. Retrieved April 11, 2023, from <https://cutt.ly/WwrqS2yw>
- Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G., & Scanlon, B. R. (2012). Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, 59–60, 143–156. <https://doi.org/10.1016/J.JOG.2011.05.001>
- Dorado, D., Tafur, H., & Ríos, L. (2013). Rendimiento y calidad de la fruta del Maracuyá Amarillo (*passiflora edulis fo. flavicarpa o. deg.*) en respuesta a la combinación del riego y la fertilización. *Revista Ingeniería de Los Recursos Naturales y Del Ambiente - EIDENAR*. <https://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/12/1.htm>
- Duque-Trujillo, J. ., & Saldarriaga, M. (2020). Kinematics and stress field analysis from a major strike-slip fault on the Northern Andes : the Palestina Fault System [Universidad EAFIT]. In *Repositorio Institucional Universidad Eafit* . <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/17032>
- Duque, D., & Mejia, L. (2011). Optimización de los subproductos del Fique. *PHYTO - Universidad ICESI*. <https://cutt.ly/kwrqDw3Y>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>
- Finagro. (n.d.). Fique, producción y zonas de producción. Retrieved March 28, 2023, from

<https://cutt.ly/owrqDaH3>

FINAGRO. (n.d.). Ficha de inteligencia Tabaco. Retrieved March 27, 2023, from

<https://cutt.ly/1wrqDIEH>

Galvís-Villamizar, D. N., Duque-Suárez, O. M., & Gómez-Camperos, J. A. (2022). Photovoltaic solar energy in Colombia. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(5), 2151–2164. <https://doi.org/10.1007/S13198-022-01745-8/FIGURES/5>

Giraldo, L., & Sandoval, J. (1996). Manual técnico. El cultivo de la cebolla cabezona. SENA. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/7610>

Google Developers. (n.d.-a). ESA WorldCover 10m v100. Earth Engine Data Catalog. Retrieved March 17, 2023, from https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ESA_WorldCover_v100#description

Google Developers. (n.d.-b). PML_V2 0.1.7: Coupled Evapotranspiration and Gross Primary Product (GPP) . Earth Engine Data Catalog. Retrieved March 17, 2023, from <https://cutt.ly/mwrqDJa4>

Google Developers. (n.d.-c). Resampling and Reducing Resolution . Google Earth Engine. Retrieved May 4, 2023, from <https://developers.google.com/earth-engine/guides/resample>

Gorjian, S., Singh, R., Shukla, A., & Mazhar, A. R. (2020). On-farm applications of solar PV systems. *Photovoltaic Solar Energy Conversion: Technologies, Applications and Environmental Impacts*, 147–190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00006-5>

Gutiérrez, A. (2022). Incidencia del Plan Integral de Gestión de Cambio Climático-PIGCC en los acuíferos de Caldas. *Semana Del Agua*. https://drive.google.com/drive/folders/1VSUWomjp8mIHsKD23KQW5-ZsW8vhupn_

Huang, Z., Hejazi, M., Tang, Q., Vernon, C. R., Liu, Y., Chen, M., & Calvin, K. (2019). Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes. *Journal of Hydrology*, 574, 242–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.046>

-
- Hunter, J. J., Archer, E., Van Schalkwyk, D., Strever, A. E., & Volschenk, C. G. (2016). Grapevine roots: Interaction with natural factors and agronomic practices. *Acta Horticulturae*, 1136, 63–80. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2016.1136.10>
- IDEAM. (n.d.). Atlas Interactivo - Radiación IDEAM. 2014. Retrieved February 19, 2023, from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. www.ideam.gov.co
- IDEAM. (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>
- IDEAM. (2023a). Estudio Nacional del Agua 2022. IDEAM. <https://cutt.ly/1wthIrDo>
- IDEAM. (2023b). Estudio Nacional del Agua 2022 - Anexo 1. Oferta, demanda, calidad, zonas inundables. In IDEAM.
- IDEAM. (2023c). Estudio Nacional del Agua 2022 - Anexo 5a. Erosión hídrica potencial. IDEAM. <https://cutt.ly/IwrqD35i>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2017). Tercera comunicación nacional de Colombia a la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. <https://www.cambioclimatico.gov.co/en/3ra-comunicacion-cambio-climatico>
- IDEAM, & U.D.C.A. (2015). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. In *Gestión y Ambiente*. IDEAM. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>
- IGAC. (2010). Datos Abiertos Subdirección de Agrología. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- Infoagro. (n.d.). El cultivo de la Lechuga. Infoagro Systems, S.L. <https://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm>
- Intagri. (n.d.). Riego por Goteo para el Cultivo de Cítricos . Retrieved March 21, 2023, from <https://cutt.ly/JwrqFgsG>
- Inteinsa. (2018). Estudio geológico – geotécnico Proyecto Fotovoltaico Tepuy, La Dorada,

Caldas. 1–96.

INVIAS. (n.d.). Red Vial Nacional. Retrieved March 18, 2023, from <https://cutt.ly/hwthIOdU>

IRMAC. (n.d.). La Dorada, Caldas. Corporación Programa Desarrollo Para La Paz Del Magdalena Centro. Retrieved March 16, 2023, from <https://pdpmagdalenacentro.org/pagina2017/sistema-de-informacion-irmac-la-dorada/>

ISA, & DNP. (2018, June 27). Centrales generadoras, líneas de transmisión eléctrica y principales embalses de Colombia (DNP, UPME, ISA, SWBD). <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=4d8114e175d64fe9a8218f3890c4a029>

Jaramillo, J., Cárdenas, J., & Orozco, J. (2009). Manual sobre el cultivo del maracuyá (*Passiflora edulis*) en Colombia . Corpoica. www.produmedios.org

Jaramillo, N. (2014). Influencia del cultivo del aloe vera en los procesos de recuperación de los suelos del bosque seco tropical . Universidad Militar Nueva Granada. <https://cutt.ly/SwrqFYEH>

Kruitwagen, L., Story, K. T., Friedrich, J., Byers, L., Skillman, S., & Hepburn, C. (2021). A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature* 2021 598:7882, 598(7882), 604–610. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03957-7>

Lamb, A., Weers, B., McKinley, B., Rooney, W., Morgan, C., Marshall-Colon, A., & Mullet, J. (2022). Bioenergy sorghum’s deep roots: A key to sustainable biomass production on annual cropland. *GCB Bioenergy*, 14(2), 132–156. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12907>

Leguizamón, Y. R., Rivera, A. P. T., Latorre, D. A. G., Ramírez, L. F. G., & Molano, P. J. T. (2018). Modelo productivo de frijol para el Caribe seco colombiano. Editorial AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.MODEL.7402643>

Londoño, E., & Castillo, L. (2011). Análisis morfoestructural del cerro Manizales (Antioquia) y su relación con posibles manifestaciones auríferas en el batolito Antioqueño. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 29(29). <https://cutt.ly/rwrqFZWT>

-
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132.
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2013.04.012>
- Martínez, L., Valencia, L., Ceballos, J., Narváez, B., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, J., & Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá - Manizales -Popayán.
- Maya, M., & Gonzalez, H. (1995). Unidades Litodemicas En La Cordillera. Informe Unidad Operativa Medellín, Ingeominas, 44–57.
- Mishra, H. S., Rathore, T. R., & Pant, R. C. (1997). Root growth, water potential, and yield of irrigated rice. *Irrigation Science*, 17(2), 69–75.
<https://doi.org/10.1007/S002710050024/METRICS>
- Moreno, A., López, M., & Jiménez, L. (2012). Aloe vera. Sábila. Cultivo y utilización.
<https://cutt.ly/CwrqF1B8>
- Noorollahi, E., Fadai, D., Shirazi, M. A., & Ghodsipour, S. H. (2016). Land Suitability Analysis for Solar Farms Exploitation Using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)—A Case Study of Iran. *Energies* 2016, Vol. 9, Page 643, 9(8), 643.
<https://doi.org/10.3390/EN9080643>
- NREL. (n.d.). PVWatts Calculator - National Renewable Energy Laboratory. Retrieved March 11, 2023, from <https://pvwatts.nrel.gov/>
- Ocampo, O. (2019, March). Agendas de Cambio Climático Departamento de Caldas. Corpocaldas. <https://historico.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1599/2019-03-22/11-1-AgendasClimaticasCaldas-OlgaOcampo.pdf>
- Ocampo, O., Restrepo, A., Botero, A., Forero, A., Ospina, C., Marín, E., Ríos, J., Álvarez, J., Castañeda, K., Montoya, K., Salazar, K., Becerra, L., Berrio, L., Pineda, R., Gómez, S., &

-
- González, T. (2019). Agendas de Cambio Climático La Dorada – Caldas. Corpocaldas.
<https://cutt.ly/hwrqGwV2>
- Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., & Heath, G. (2013). Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. NREL. www.nrel.gov/publications.
- Owuor, S. O., Butterbach-Bahl, K., Guzha, A. C., Rufino, M. C., Pelster, D. E., Díaz-Pinés, E., & Breuer, L. (2016). Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 5(1), 1–21.
<https://doi.org/10.1186/S13717-016-0060-6/TABLES/4>
- Pathak, M., Slade, R., Shukla, P. ., Skea, J., Pichs-Madruga, R., & Ürge-Vorsatz, D. (2022). Technical Summary. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, 67.
<https://doi.org/10.1017/9781009157926.002>
- Perlaza, M. (2022). Efectos del Cambio Climático en la recarga potencial por precipitación en los valles de Aburrá y San Nicolás (Antioquia). [EAFIT].
<https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/31976>
- Pinedo, M. (2019). Horas de luz en el desarrollo vegetativo de aloe vera “Sabila” en Iquitos. Loreto – 2017 [Universidad Nacional de la Amazonía Peruana].
https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/6195/Mayra_Tesis_Titulo_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Porras, J., Ariza, H., & Muñoz, L. (2019). Cartilla Técnica del Cultivo de Fique. Minagricultura .
<https://cutt.ly/2wrqGpCq>
- Pörtner, H., Debra C., R., Adams, H., Adelekan, I., Adler, C., Adrian, R., Aldunce, P., & Ali, E. (n.d.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Technical Summary*. IPCC Sixth Assessment Report. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>

-
- Poveda, G., & Mesa, Ó. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica En México*, XI. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/765/726>
- Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R., Elchinger, M., & Stoltenberg, B. (2016). Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands. *Applied Energy*, 165, 383–392. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.12.078>
- Restrepo, J. D., & Escobar, H. A. (2018). Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology*, 302, 76–91. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2016.12.013>
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (2020). Tectonostratigraphic terranes in Colombia: an update. *The Geology of Colombia*, 1, 37–63.
- Rodríguez-Urrego, D., & Rodríguez-Urrego, L. (2018). Photovoltaic energy in Colombia: Current status, inventory, policies and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 160–170. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.065>
- Ruiz, J. A., Medina, G., González, I., Flores, H., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K., & Martínez, R. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos 2da edición*. <https://cutt.ly/JwthOLFA>
- RUNAP. (n.d.). *Distritos Nacionales de Manejo Integrado*. Retrieved March 18, 2023, from <https://runap.parquesnacionales.gov.co/categoria/SINAP/11>
- SAG, E. (2020). *Capítulo 4: Área de Influencia*. 29.
- SAG, & EPM. (2020a). *Capítulo 3: Descripción del Proyecto EIA*.
- SAG, & EPM. (2020b). *Estudio de impacto ambiental, Cap6, proyecto Parque Solar Fotovoltaico Tepuy*. EPM, 60.
- Sajjad, M. M., Wang, J., Abbas, H., Ullah, I., Khan, R., & Ali, F. (2022). Impact of Climate and Land-Use Change on Groundwater Resources, Study of Faisalabad District, Pakistan.

Atmosphere, 13(7). <https://doi.org/10.3390/atmos13071097>

Salazar, N. (2019). Implementación de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) como nueva alternativa de diversificación agrícola, en el municipio de Chaparral, Tolima [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ingenieria_agronomica/139

Sánchez, C., Arrieta, A., Flórez, S., Mercado, T., Martínez, J., & Martínez, A. (2004). Requerimiento hídrico de la berenjena *Solanum melongena* L. bajo riego por goteo en el Valle del Sinú. *Agronomía Colombiana - Universidad Nacional de Colombia*. <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180318264009.pdf>

Sánchez, M. (n.d.). Recomendaciones técnicas para el cultivo de maíz en el Creced Magdalena Medio Caldense. Corpoica – Agrosavia.

SAS planet. (n.d.). SASplanet. Retrieved February 19, 2023, from <https://sasplanet.geojamal.com/>

Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., & Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265(February), 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>

Secretaría de agricultura y pesca. (n.d.). Guía agronómica de los cultivos representativos del departamento para la realización de las estimaciones por métodos indirectos – EAMI. Departamento del Valle del Cauca.

SGC. (2020). Mapa Geológico de Colombia 2020. Portal Servicio Geológico Colombiano. https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1M2020.aspx

Shiklomanov, I. A. (1997). Comprehensive assessment of the freshwater resources and water availability in the world: assessment of water resources and water availability in the world. In World Meteorological Organization.

-
- Shrestha, M., Acharya, S. C., & Shrestha, P. K. (2017). Bias correction of climate models for hydrological modelling – are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, 24(3), 531–539. <https://doi.org/10.1002/met.1655>
- Siddik, M. S., Tulip, S. S., Rahman, A., Islam, M. N., Haghghi, A. T., & Mustafa, S. M. T. (2022). The impact of land use and land cover change on groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, 315, 115130. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115130>
- Silva, H., Sagardia, S., Seguel, O., Torres, C., Tapia, C., Franck, N., & Cardemil, L. (2010). Effect of water availability on growth and water use efficiency for biomass and gel production in Aloe Vera (*Aloe barbadensis* M.). *Industrial Crops and Products*, 31(1), 20–27. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2009.08.001>
- Silva, J. (n.d.). Cultivo de yuca: conoce su siembra y manejo agronómico. Retrieved March 22, 2023, from <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/el-cultivo-de-la-yuca/>
- Sinisterra, C., & Orozco, A. (2014). Evaluación del rendimiento de la Papachina (colocasia esculenta L.) en dos fincas del corregimiento no. 8 de Buenaventura, Valle del Cauca. Universidad Del Pacífico. <https://cutt.ly/pwrqG1rX>
- SOLARGIS. (2022). Mapas de recursos solares y datos GIS para más de 180 países | Solargis. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/colombia>
- UdeA, & DAGRAN. (2022). SAMA (Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia). <https://dagran.antioquia.gov.co/sama>
- UPME. (2021). Balance energético colombiano (BECO). <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>
- UPME. (2023a). Asignación Capacidad Proyectos Clase Uno - Subárea Operativa 6. Caldas, Quindío y Risaralda, Excel MACC - Bolsa 3. Unidad de Planeación Minero Energética. <https://cutt.ly/GwrqHqi7>

-
- UPME. (2023b). Reporte de cálculo de capacidad por barra para la sub-área Caldas Quindío Risaralda – CQR. <https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/InformesAsignaciónFinalporAreas/CQR/5.ReportedeCapacidadporBarra-CQR.pdf>
- USA Rice Federation. (n.d.). How Rice Grows. Retrieved March 21, 2023, from <https://www.usarice.com/thinkrice/discover-us-rice/how-rice-grows>
- Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapınar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11–17. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.07.042>
- Villamil, D. (2013). Siembra y transformación de Papa China como alternativa para mejorar los ingresos y el abastecimiento alimentario de la comunidad de Zacarías ubicada en la zona rural de Buenaventura. [Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD]. <https://cutt.ly/ewrqHyuc>
- Villegas Villa, L. D. (2021). Proyecciones de cambio climático derivadas del proyecto CMIP5 para Colombia y su comparación con las Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18407>
- Vinasco, B., & Moreno, M. (2015). Estudio morfológico de helechos hallados en la formación mesa (plioceno) entre los Municipios de la Dorada y Norcasia, al oriente de Caldas [Universidad de Caldas]. <https://catalogo.ucaldas.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=51776>
- Wikifarmer. (n.d.). Cultivo de Berenjenas al Aire Libre con Fines de Lucro - Guía de Crecimiento Completa de Principio a Fin. Retrieved March 21, 2023, from <https://wikifarmer.com/es/cultivo-de-berenjenas-al-aire-libre-con-fines-de-lucro-guia-de-crecimiento-completa-de-principio-a-fin/>
- Willis, H. (2008). Better-Performing Soil Types for Growing Soybeans / How to Grow Super Soybeans . EcoFarming Daily. <https://cutt.ly/GwrqHVwU>

-
- Wu, W. Y., Lo, M. H., Wada, Y., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., Yeh, P. J. F., Ducharne, A., & Yang, Z. L. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-020-17581-Y>
- Zapata, H., Valles, C., & Segura, A. (2022). Informe de Registro de Proyectos de Generación (corte a noviembre 30 de 2022). UPME, 0520, 42. http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2021/Registro_marzo_2021.pdf
- Zapata, H., Valles, C., & Segura, A. (2023a). Informe de Registro de Proyectos de Generación (corte a marzo 31 de 2023) (p. 37).
- Zapata, H., Valles, C., & Segura, A. (2023b). Informe de registro de proyectos de generación de electricidad. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). <https://cutt.ly/jwrqH8tW>
- Zhang, Y., Kong, D., Gan, R., Chiew, F. H. S., McVicar, T. R., Zhang, Q., & Yang, Y. (2019). Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017. *Remote Sensing of Environment*, 222, 165–182. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.12.031>