

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

MAESTRÍA VIRTUAL EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

**ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO DAVID, CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CHIRIQUÍ (108),
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL GRADO DE**

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

BRENDA JANETH ARAÚZ DELGADO

TURRIALBA, COSTA RICA

2023

Este trabajo de final de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Examinador de la estudiante, como requisito para optar por el grado de

División de Educación

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

FIRMANTES:



William Jefferson Watler Reyes

William Watler Reyes, M.Sc.

Director Principal del Trabajo de Graduación

Sergio Velásquez Mazariegos, M.Sc.

Miembro Comité Asesor del Trabajo de Graduación

Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.

Decana, a.i., de la Escuela de Posgrado

Brenda Janeth Araúz Delgado

Candidata

Escuela de Posgrado

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de grado con gran cariño a mis padres, Vivian y Faustino, por siempre impulsarme a seguir adelante y alcanzar mis metas académicas y sobre todo por el apoyo incondicional que he recibido de ustedes en todo momento. Gracias por sus consejos y motivarme a lograr con éxito esta carrera universitaria.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a Dios, por acompañarme en cada paso que doy, por brindarme salud y sabiduría, y guiarme en todo momento.

A los profesores asesores de este trabajo de grado por su orientación, colaboración permanente y diligente seguimiento para culminar el estudio.

A mis compañeros de la maestría, quienes me brindaron su apoyo, compartieron sus conocimientos y aportes importantes a lo largo de la carrera universitaria, en especial a Carlina y Guillermo.

En general, agradezco a todas las personas que colaboraron con sus valiosas aportaciones y contribuyeron directa e indirectamente en la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación del tema	3
1.3 Importancia.....	4
1.4 Objetivo general	5
2. Revisión de literatura.....	6
2.1 Rendimiento hídrico	6
2.2.1 Relación del uso del suelo y cobertura terrestre con el rendimiento hídrico.....	6
2.2 El rendimiento hídrico y el cambio climático.....	7
2.3 Importancia del rendimiento hídrico en los ecosistemas.....	7
2.4 Escenarios de cambio climático según las SSP	7
2.5 Aplicación de los modelos climáticos globales en Panamá	9
3. Metodología.....	11
3.1 Ubicación del área de estudio.....	11
3.2 Descripción del área de estudio.....	11
3.2.1 Características biofísicas	11
3.2.2 Características socioeconómicas	13
3.3 Procedimientos metodológicos	14
3.3.1 Estimación de la disponibilidad actual y futura de agua en las áreas potenciales de rendimiento hídrico.....	14
3.3.1.1 Ecuaciones del modelo Annual Water Yield (AWY) de InVEST	15
3.3.1.2 Insumos para el modelo Annual Water Yield (AWY).....	17
3.3.1.3 Estimación de la disponibilidad de la producción de agua actual y futura	21
3.3.1.4 Producción del rendimiento hídrico (PRH)	24
3.3.2 Determinación de los cambios, pérdidas y ganancias de áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) para el escenario actual y futuro de cambio climático.....	24
3.3.3 Líneas de acción para el manejo, gestión y protección de las APRH frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río David	26
3.3.3.1 Análisis FODA	27
4. Resultados.....	31
4.1 Rendimiento hídrico en el escenario actual y futuro de cambio climático	31

4.1.1 Distribución del rendimiento hídrico actual y futuro utilizando los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del Modelo FIO-ESM-2-0.....	35
4.1.2 Producción del rendimiento hídrico (PRH) en el escenario actual y futuro de cambio climático.....	36
4.2 Pérdida y ganancia de áreas potenciales de áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH).....	40
4.3 Lineamientos de acción para el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río David.....	49
4.3.1 Aplicación de la matriz del Análisis FODA.....	49
4.3.2 Valoración de los factores internos y externos del Análisis FODA.....	50
4.3.3 Estrategias para el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) frente al cambio climático en la subcuenca del río David....	52
5. Análisis de la experiencia.....	56
6. Conclusiones.....	58
7. Recomendaciones.....	59
8. Referencias bibliográficas.....	61
9. Anexos.....	64

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Narrativa de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas	8
Cuadro 2. Capacidad agrológica de las tierras en la subcuenca del río David	12
Cuadro 3. Población total de la subcuenca del río David	13
Cuadro 4. Parámetros de entrada del modelo AWY	22
Cuadro 5. Atributos biofísicos de la subcuenca del río David	23
Cuadro 6. Ejemplo de la reclasificación los pixeles de la capa de cambios de producción de rendimiento hídrico (PRH).....	25
Cuadro 7. Ejemplo de pérdida de áreas potenciales de rendimiento hídrico (PRH)	25
Cuadro 8. Ejemplo de ganancia de áreas potenciales de rendimiento hídrico (PRH)	26
Cuadro 9. Matriz del análisis FODA	28
Cuadro 10. Escala de valoración de los factores internos y externos del análisis FODA	28
Cuadro 11. Matriz de evaluación de los factores internos.....	29
Cuadro 12. Matriz de evaluación de los factores externos	29
Cuadro 13. Matriz de análisis FODA cruzado.....	30
Cuadro 14. Rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración real promedio anual de la subcuenca del río David en el escenario actual y futuro.....	31
Cuadro 15. Matriz del Análisis FODA	49
Cuadro 16. Listado de los planes de acción identificados para el manejo, gestión y protección de las APRH frente al cambio climático en la subcuenca del río David	53
Cuadro 17. Planes de acción a corto, mediano y largo plazo para el manejo, gestión y protección de las APRH frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río David	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Panorama de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas	9
Figura 2. Regiones hidroclimáticas de la República de Panamá.....	10
Figura 3. Mapa de localización de la subcuenca del río David	11
Figura 4. Diagrama conceptual del balance de agua utilizado en el modelo anual de producción de agua	14
Figura 5. Parámetros de entrada del modelo Annual Water Yield de InVEST	23
Figura 6. Proyección del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual para el escenario actual y los escenarios SSP1-2.6.....	32
Figura 7. Proyección del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual para el escenario actual y los escenarios SSP5-8.5.....	32
Figura 8. Variación porcentual del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración real promedio anual entre los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050 para la subcuenca del río David.....	33
Figura 9. Diferencia neta (mm/año) del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual entre los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050 para la subcuenca del río David.....	34
Figura 10. Distribución del rendimiento hídrico en la subcuenca del río David para el escenario actual y del escenario SSP1-2.6 en los períodos 2030 y 2050.....	35
Figura 11. Distribución del rendimiento hídrico en la subcuenca del río David para el escenario actual y del escenario SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050.....	35
Figura 12. Producción del rendimiento hídrico en el escenario actual en la subcuenca del río David.....	36
Figura 13. Producción del rendimiento hídrico (PRH) para el escenario SSP1-2.6 del período 2030.....	37
Figura 14. Producción del rendimiento hídrico (PRH) para el escenario SSP1-2.6 del período 2050 en la subcuenca del río David	38
Figura 15. Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP5-8.5 del período 2030 en la subcuenca del río David	38
Figura 16. Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP5-8.5 del período 2050 en la subcuenca del río David	39
Figura 17. Pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2030 en la subcuenca del río David.....	41
Figura 18. Mapa de la pérdida de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2030	41
Figura 19. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2030 en la subcuenca del río David.....	42
Figura 20. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2030	42
Figura 21. Pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2050 en la subcuenca del río David.....	43
Figura 22. Mapa de la pérdida de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2050	43

Figura 23. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2050 en la subcuenca del río David.....	44
Figura 24. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2050	44
Figura 25. Pérdida APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030 en la subcuenca del río David.....	45
Figura 26. Mapa de la pérdida APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030	45
Figura 27. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del 2030 en la subcuenca del río David.....	46
Figura 28. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030	46
Figura 29. Pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050 en la subcuenca del río David	47
Figura 30. Mapa de la pérdida de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050	47
Figura 31. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del 2050 en la subcuenca del río David.....	48
Figura 32. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050	48
Figura 33. Análisis FODA para la identificación de acciones de manejo, gestión y protección de las APRH de la subcuenca del río David frente al cambio climático	51

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

APRH	Áreas potenciales de rendimiento hídrico
AWY	Annual water yield
CATHALAC	Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
ECC	Escenario de cambio climático
IDAAN	Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales
IDIAP	Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá
InVEST	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAAR ´s	Juntas de Administración de Acueductos Rurales
MEDUCA	Ministerio de Educación
MIAMBIENTE	Ministerio de Ambiente
MIDA	Ministerio de Desarrollo Agropecuario
PRH	Producción de rendimiento hídrico
RH	Rendimiento hídrico
SE	Servicios ecosistémicos
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
Ha	Hectárea
Km ²	Kilómetro cuadrado
mm	milímetros

Resumen

El rendimiento hídrico es un servicio ecosistémico vital para la producción de agua dulce en las cuencas hidrográficas. Sin embargo, la provisión de este servicio para los seres humanos y ecosistemas se ve afectado debido al cambio climático en distintas regiones del mundo. Para abordar esta preocupación en la gestión del agua a nivel local, en este estudio de investigación se analizó la disponibilidad actual y futura del agua en la subcuenca del río David, ubicada en la cuenca hidrográfica del río Chiriquí, República de Panamá.

En primer lugar, se estimó el rendimiento hídrico (RH) actual y en escenarios de cambio climático, luego se categorizaron las áreas de baja, media, alta y muy alta producción de rendimiento hídrico (PRH). Posteriormente, se determinó los cambios, pérdidas y ganancias de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) para comparar la distribución geoespacial del RH actual con los escenarios de cambio climático. Por último, se proponen lineamientos de acción para el manejo, gestión y protección APRH frente al cambio climático a partir de la formulación de estrategias, a través de los actores clave de la subcuenca del río David.

Se aplicó el modelo Annual Water Yield (AWY) del programa de Valoración Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (InVEST) para la estimación del rendimiento hídrico promedio anual para el escenario actual y con proyecciones de cambio climático utilizando el modelo climático global (MCG) FIO-ESM-2-0 según las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP), bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050.

El modelo AWY permite estimar y mapear la producción de agua a nivel de píxel, cuenca o subcuenca hidrográfica y está basado en el marco hidrológico de Budyko, considerando como parámetros de entrada las variables de precipitación y evapotranspiración de referencia media anual, el uso de la tierra y cobertura terrestre, profundidad de la capa de restricción radical, contenido de agua disponible para las plantas, el factor de estacionalidad y un cuadro de los atributos biofísicos del uso de tierra y cobertura terrestre.

Con base en los resultados, el área de estudio posee un rendimiento hídrico (RH) promedio anual de 2,104.98 mm/año en el escenario actual. Para el escenario SSP1-2.6, el RH se estimó en 2,053.07 mm/año al 2030 y 2,153.72 mm/año al 2050. En el escenario SSP5-8.5 el RH obtenido fue de 2,028.97 mm/año al 2030 y 2,017.35 mm/año al 2050. Se determinó que las zonas identificadas con las categorías de media y alta PRH tendrán una mayor distribución en el territorio a diferencia de las categorías de baja y muy alta PRH, tanto para el escenario actual como en los escenarios de cambio climático.

En el análisis de los cambios de las APRH, se identificaron las zonas que sufrirán pérdida o ganancias de áreas en la distribución geoespacial del escenario actual a los escenarios futuros de cambio climático. Se obtuvo que la variación del RH en cada uno de los escenarios analizados está condicionado principalmente a las proyecciones de precipitación y temperatura del MCG FIO-ESM-2-0 y los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050.

Palabras clave: rendimiento hídrico, cambio climático, modelo InVEST, modelo climático global, precipitación, uso de la tierra y cobertura terrestre, subcuenca del río David.

Abstract

Water yield is a vital ecosystem service for freshwater production in watersheds. However, the provision of this service for humans and ecosystems is affected due to climate change in different regions of the world. To address this concern in water management at the local level, this research study analyzed the current and future water availability in the David sub-basin, located in the Chiriquí watershed, Republic of Panama.

First, the current and climate change scenarios water yield (WY) was estimated, then the areas of low, medium, high and very high water yield production (WYP) were categorized. Subsequently, changes, losses and gains of potential water yield areas (PWYA) were determined to compare the geospatial distribution of current HR with climate change scenarios. Finally, action guidelines are proposed for the management and protection of PWYA against of climate change based on the formulation of strategies, through stakeholders in the David sub-basin.

The Annual Water Yield (AWY) model of the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) program was applied to estimate the average annual water yield for the current scenario and with climate change projections using the FIO-ESM-2-0 global climate model (GCM) according to the shared socioeconomic pathways (SSP), under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios for the periods 2030 and 2050.

The AWY model allows estimating and mapping water production at the pixel, watershed or sub-basin and is based on the Budyko hydrological framework, considering as input parameters the variables of precipitation and reference evapotranspiration mean annual, land use and land cover, depth of the root restriction layer, plant available water content, seasonality factor and a biophysical attribute table of land use and land cover.

Based on the results, the study area has an average annual water yield (WY) of 2,104.98 mm/year in the current scenario. For the SSP1-2.6 scenario, the WY was estimated at 2,053.07 mm/year in 2030 and 2,153.72 mm/year in 2050. In the SSP5-8.5 scenario, the WY obtained was 2,028.97 mm/year in 2030 and 2,017.35 mm/year in 2050. It was determined that the zones identified with the medium and high WYP categories will have a greater distribution in the territory as opposed to the low and very high WYP categories, both for the current scenario and climate change scenarios.

In the analysis of changes in the PWYA, the zones that will suffer loss or gain of areas in the geospatial distribution from the current scenario to the future climate change scenarios were identified. It was obtained that the HR variation in each of the scenarios analyzed is mainly conditioned to the precipitation and temperature projections of the GCM FIO-ESM-2-0 and the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios for the periods 2030 and 2050.

Key words: water yield, climate change, InVEST model, global climate model, precipitation, land use and land cover, David sub-basin.

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La República de Panamá es vulnerable a los efectos del cambio climático, particularmente a los aumentos de la temperatura de los océanos y la atmósfera, los cambios en los patrones de precipitación, el aumento del nivel del mar, los efectos sobre el recurso hídrico superficial y subterráneo, así como el impacto que todo esto ejerce sobre la fauna y flora (Cárdenas 2021). Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL 2015) citado por el Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE 2019), Panamá se enfrenta a un nivel de vulnerabilidad al cambio climático severo para el año 2030, lo que hace inevitable y urgente la implementación de medidas de adaptación y mitigación que reduzcan estas vulnerabilidades.

Según Cárdenas (2022), la década del año 2010 representó para Panamá la bonanza de los estudios regionalizados en cuencas hidrológicas concernientes a los efectos del cambio climático. Los estudios han sido enfocados generalmente a cuencas priorizadas por su vulnerabilidad al cambio climático, como por ejemplo en las cuencas de los ríos Tabasará en la provincia de Chiriquí y Chucunaque en la provincia de Darién, y en evaluar la capacidad local para la implementación de medidas de adaptación y mitigación (Sanjur 2010).

Recientemente, se han realizado otras investigaciones en el país que involucran la utilización de escenarios de cambio climático, tales como el análisis de anomalías climáticas basado en los escenarios RCP para la cuenca del río La Villa, en la provincia de Los Santos (García et al. 2020), y el estudio prospectivo de las tendencias y escenarios de la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (Banco Interamericano de Desarrollo [BID] 2022).

Un avance importante en el estudio de escenarios de cambio climático (ECC) aplicados al contexto de Panamá fue la utilización de los Modelos Climáticos Globales (MCG) recomendados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, por sus siglas en inglés), presentados en el Quinto Informe de Evaluación y en la Tercera Comunicación Nacional (TCN) sobre Cambio Climático realizada por MIAMBIENTE en el año 2019.

En el año 2022 MIAMBIENTE a través de la Dirección de Cambio Climático (DCC), presentó los resultados de la actualización de ECC con una Visión al 2030, 2050 y 2070 según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC, considerándose como una herramienta heurística para examinar el cambio ambiental y social en Panamá, a partir de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP por sus siglas en inglés) (Cárdenas 2022).

El objetivo de esta nueva visión de los ECC es contribuir con información actualizada para apoyar el desarrollo de estudios, investigaciones y planificación de medidas de adaptación a nivel local, contemplando los posibles impactos asociados a la variabilidad, cambios y riesgos climáticos, como una posible representación del clima a futuro en el país. Sin embargo, la incertidumbre asociada al cambio climático y los impactos sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad del agua incentivan aún más la necesidad de generar inventarios detallados de los recursos hídricos actuales (Tallis y Polasky 2009 citado por Minga et al. 2018).

El rápido desarrollo reciente de la tecnología de sensores remotos y de modelos hidrológicos ha llevado a analizar y evaluar de manera cuantitativa, visual, y detallada la función de producción de agua de un ecosistema regional, a través de la simulación de los modelos hidrológicos (Yu et al. 2022).

No obstante, el modelado de los servicios hidrológicos requiere un esfuerzo de implementación y una cantidad considerable de datos, los cuales pueden no estar siempre disponibles. Por esta razón, es necesario explorar herramientas accesibles que requieran de poca información, pero que aún así puedan proporcionar un buen escenario general de los servicios hidrológicos disponibles (Minga et al. 2018).

Específicamente, para evaluar el servicio ecosistémico relacionado con la producción de agua, el software InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) comprende de varios modelos como el Annual Water Yield, que permite modelar a escala espaciotemporal la producción de agua anual basado en los principios del balance hídrico (Zhang et al. 2012), en la curva de Budyko, la evapotranspiración potencial y la precipitación media anual (Lovera et al. 2018). El modelo permite la estimación cuantitativa de la producción de agua en diferentes tipos de paisaje, y los resultados se pueden informar en forma de archivos de cuadros y mapas de cuadrícula (Li et al. 2021 citado por Wei et al. 2021).

Estudios anteriores han evaluado con éxito el rendimiento de agua de diferentes escalas de cuencas en diferentes regiones del mundo, incluyendo Irán, India, Europa y China, utilizando InVEST. Estos estudios han explorado los efectos del clima y los cambios de uso de la tierra y cobertura boscosa en las variaciones espaciales y temporales del rendimiento hídrico (Wei et al. 2021).

InVEST se ha aplicado a varios sitios y contextos de decisión. Por ejemplo, en la cuenca del río Xitiaoxi en China se utilizó para evaluar el servicio ecosistémico del rendimiento hídrico (Zhang et al. 2012), y en la cuenca del río Mish-khas, provincia de Ilam, Irán se empleó para estimar el rendimiento anual de agua para diferentes usos de la tierra (Jafarzadeh et al. 2019). En países del continente americano, también se ha implementado el uso de InVEST, como en Argentina para el estudio de la producción de agua en la cuenca del río Limay (Pessacg et al. 2018), y en el Municipio de Valle de Bravo, Estado de México para evaluar el servicio ecosistémico del rendimiento hídrico entre los años 1994 y 2016 (Lovera et al. 2018).

Con respecto al cambio climático, InVEST se ha utilizado para el análisis del cambio del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios climáticos futuros en la Región Sur del Ecuador (Minga et al. 2018), y en la evaluación de los impactos del cambio climático y del uso de la tierra en el rendimiento del agua en las regiones aguas arriba de la cuenca del río Shule en China (Wei et al. 2021).

Es importante mencionar que en Panamá existe un primer acercamiento registrado de la utilización de InVEST a través de MIAMBIENTE, el Fondo de Adaptación y la Fundación Natura en el Programa de adaptación al cambio climático, para la gestión integral del recurso hídrico. En este programa se realizó un curso internacional de Adaptación al Cambio Climático: papel de los Servicios de los Ecosistemas enfocado a la aplicación del modelo de almacenamiento y secuestro de carbono (Fondo de Adaptación 2019).

1.2 Justificación del tema

En la Tercera Comunicación Nacional (TCN) de Panamá sobre Cambio Climático presentada por MIAMBIENTE (2019), se indicó un aumento sustancial del número de eventos extremos de lluvia en el país, los cuales tienen impactos directos en múltiples sectores. Por otra parte, se determinó también una relativa disminución en los acumulados de lluvia a nivel nacional, particularmente bajo la influencia del fenómeno de El Niño. Estas situaciones conllevan a grandes retos para el abastecimiento del agua potable tanto en la ciudad capital como en provincias donde el tema del abastecimiento de agua para consumo humano tiene mayor competencia ante el aumento de la demanda del recurso en todas las actividades sociales y económicas.

En el Proyecto de Evaluación de Necesidades Tecnológicas (ENT) ante el Cambio Climático realizado por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe (CATHLAC 2017), se señala que en ciudades importantes de Panamá como Darién, Penonomé, Chorrera, David o Chepo, ante su crecimiento y desarrollo económico, se deben realizar mayores esfuerzos para articular la gestión del riesgo a desastres en materia de adaptación al cambio climático en la planificación del territorio, considerando los recursos hídricos como un elemento central.

Actualmente, la ciudad de David, ubicada en la provincia de Chiriquí, utiliza como fuente principal al río David para abastecer de agua a la Planta Potabilizadora de Los Algarrobos del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), suministrando este vital líquido a seis corregimientos integrados por David, Las Lomas, Pedregal, San Carlos, San Pablo Viejo y Los Algarrobos, con una población total aproximada de 175,530 habitantes para el año 2021 (IDAAN, 2022). Sin embargo, se ha registrado que el caudal de los afluentes del río David ha disminuido hasta un 30% en épocas secas, lo que ha provocado discontinuidad en el servicio de la planta potabilizadora, especialmente en las zonas altas del distrito de David (Vega 2012).

De acuerdo con el listado de las Juntas Administradoras de Acueductos Rurales (JAAR's) que poseen personería jurídica, la subcuenca del río David abastece de agua a los usuarios de la parte media y alta en las comunidades rurales de los corregimientos de Guacá y San Carlos en el distrito de David y en el distrito de Dolega, así como a los usuarios de las comunidades rurales de Rovira, Potrerillos Arriba, Potrerillos Abajo, Los Algarrobos, Los Anastacios y Tinajas que dependen de fuentes de aguas provenientes de las aguas superficiales como ríos, quebradas e incluso pozos (Consejo Nacional del Agua [CONAGUA] 2016).

Aunque, la subcuenca del río David es de gran importancia para el suministro de agua para consumo humano y uso agropecuario, también recibe las descargas de aguas residuales de tipo doméstico, industrial y comercial de la ciudad de David (Domínguez et al. 2010). En este sentido, existe una preocupación por el incremento en la demanda y la paulatina disminución de la calidad del recurso hídrico, principalmente por el crecimiento de la población, la expansión urbana y las inadecuadas prácticas agropecuarias que han provocado presiones sobre las zonas potenciales de recarga hídrica de esta subcuenca, la cual pertenece a la cuenca hidrográfica del río Chiriquí N°108 (Consejo Nacional para el Desarrollo Sostenible [CONADES] 2012).

En materia de manejo y gestión del recurso hídrico se implementó el “Proyecto de manejo y protección de las fuentes de agua en la Planta potabilizadora de Los Algarrobos” desarrollado por CONADES en el año 2012. Se realizaron prácticas agropecuarias sostenibles, restauración de bosques de galería, identificación de zonas de recarga hídrica (ZRH) y se planteó la elaboración de un acuerdo municipal para la protección de las ZRH en la subcuenca del río David, mediante un marco jurídico. Sin embargo, la elaboración de dicho acuerdo a través del Concejo Municipal de Dolega no se pudo concretar, a pesar de los avances logrados durante la ejecución del proyecto.

Por esta razón, se propone realizar el presente estudio sobre el análisis del cambio climático en la disponibilidad de agua en la subcuenca del río David para estimar el rendimiento hídrico actual y futuro, aplicando el modelo de Annual Water Yield (AWY) del software InVEST. Los resultados serán un recurso valioso para la planificación y gestión del agua, generación de información técnica y científica para apoyar al fortalecimiento de la gobernanza, gestión y liderazgo del recurso hídrico en el área de estudio.

Para el desarrollo de esta investigación, se ha considerado la participación de actores clave, como las autoridades locales, instituciones gubernamentales, productores, grupos de ONG ambientales, el Comité de cuenca hidrográfica del río Chiriquí (108), empresa privada, líderes comunitarios y usuarios del agua de la subcuenca del río David. La finalidad de esta colaboración es proponer estrategias para asegurar la disponibilidad del agua en el abastecimiento de la población y su uso en actividades agropecuarias e industriales, especialmente durante la época seca, tomando como eje central al cambio climático, ya que aunque es problema global, sus implicaciones son a nivel local.

1.3 Importancia

El Plan Nacional de Seguridad Hídrica (PNSH) de Panamá para el período 2015 al 2050 indica que el país cuenta con una disponibilidad total de agua estimada de 119.5 mil millones de metros cúbicos, de los cuales se utiliza solo el 25.8% aproximadamente. Sin embargo, se estima que la demanda de agua aumentará para el año 2050 y se prevé un excedente superior al 50% de esa disponibilidad (CONAGUA 2016). Posiblemente, este aumento de la demanda de agua en las próximas décadas pueda estar relacionado con las presiones ejercidas por el crecimiento y la movilidad de la poblacional, el desarrollo económico y tecnológico y el cambio climático.

La segunda meta del PNSH, establece la necesidad de contar con información básica sobre el agua, como la cantidad de agua disponible en las cuencas, las demandas proyectadas y las necesidades del ecosistema. Esto proporcionará una base importante para la toma de decisiones y garantizaría una administración eficiente de este recurso, a fin de satisfacer las necesidades, de: consumo humano, agropecuario, industrial, energético, transporte, turismo y biodiversidad (CONAGUA 2016).

La modelización climática se presenta como una herramienta poderosa para la planificación de la resiliencia climática a nivel mundial, ya que las proyecciones climáticas son fundamentales para una mejor toma de decisiones informada. Las estrategias de adaptación al cambio climático deben basarse en la mejor ciencia disponible, especialmente cuando se trata de los

impactos de los desastres relacionados con el cambio climático, como la disponibilidad de agua (García, Del Castillo y Saavedra 2020).

En este contexto, se realiza el análisis de la disponibilidad de agua en la subcuenca del río David perteneciente a la cuenca hidrográfica del río Chiriquí, localizada en la Región del Pacífico Occidental de Panamá. Para ello, se utilizarán los datos de escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050 del modelo climático global (MCG) FIO-ESM-2-0 desarrollado por el IPCC y utilizados por la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente de Panamá. Esta iniciativa contribuirá a estimar el rendimiento hídrico actual y futuro del área de estudio, basado en la variabilidad climática proyectada en estos nuevos escenarios aplicados al país.

En el desarrollo de la investigación, se utilizó el software InVEST para explorar el uso de esta herramienta de modelación hidrológica accesible, que requiere de poca data y a su vez permite proporcionar resultados satisfactorios en el rendimiento hídrico. InVEST posee una interfaz relativamente simple, adecuado para aplicaciones en cuencas hidrográficas que carecen de conjuntos de datos observados y proporciona un método confiable para estimar el rendimiento hídrico en diferentes escalas espaciotemporales, así como estudiar los impactos a largo plazo del clima y los cambios en el uso del suelo y cobertura terrestre (Lu et al. 2020).

La estimación del rendimiento hídrico es un proceso influenciado por varios factores como la precipitación, evapotranspiración, el uso del suelo y la cobertura terrestre, la profundidad del suelo o restricción radical y el contenido de agua disponible para las plantas. Por lo tanto, es necesario generar insumos como mapas de cada uno de estos factores, que serán parámetros para el modelo de Anual Water Yield o rendimiento hídrico anual y a su vez servirán de referencia sobre las condiciones actuales de la disponibilidad de agua actual y bajo escenarios de cambio climático en la subcuenca del río David.

1.4 Objetivo general

Analizar la disponibilidad actual y futura del agua frente a escenarios de cambio climático en las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) de la subcuenca del río David, cuenca hidrográfica (108) río Chiriquí, Panamá.

Objetivos específicos

- Estimar el rendimiento hídrico para el escenario actual y futuro de cambio climático en la subcuenca del río David.
- Determinar los cambios, pérdidas y ganancias de las APRH para el escenario actual y futuro de cambio climático.
- Proponer lineamientos de acción para el manejo, gestión y protección de las APRH de la subcuenca del río David frente a los impactos del cambio climático con enfoque de cuencas hidrográficas.

2. Revisión de literatura

2.1 Rendimiento hídrico

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2012), el rendimiento hídrico (RH) se define como la cantidad de agua superficial o subterránea que se puede obtener para un uso determinado en una cuenca durante un intervalo de tiempo dado. El concepto del rendimiento hídrico permite expresar la escorrentía por unidad de área para cuantificar la oferta hídrica superficial, estimar valores en unidades hidrográficas no instrumentadas y establecer comparaciones en diferentes unidades de análisis (Sánchez et al. 2010 citado por Minga et al. 2018).

El rendimiento hídrico de una cuenca se puede evaluar en términos de su productividad de agua y de su eficiencia para producirla. La primera se expresa como caudal medio anual por unidad de área y la segunda está dada por el coeficiente de escorrentía medio anual:

$$Pd (l/s/Km^2) = Q / A$$

$$Ef = Ce (\%) = (QL / P) * 100$$

En donde, cuanto mayor sea la precipitación y el escurrimiento en una cuenca hidrográfica y menor sea su evapotranspiración, mayor será su eficiencia hídrica; y cuanto mayor sea la precipitación y la eficiencia hídrica de una cuenca, mayor será su producción de agua (Silva 2005 p. 89).

2.2.1 Relación del uso del suelo y cobertura terrestre con el rendimiento hídrico

De acuerdo con Zhang et al. (2001) citado por Minga (2018), la cobertura vegetal influye directamente en el rendimiento hídrico a través de su estructura, por interceptación de la lluvia y transpiración. Por lo tanto, el cambio de uso del suelo y cobertura terrestre puede tener un efecto significativo en los flujos hidrológicos debido a las variaciones en las características físicas del suelo y afectar la capacidad de infiltración y la profundidad de las raíces (Yu et al. 2022).

El uso de suelo y cobertura terrestre puede modificar los ciclos hidrológicos al influir en el régimen de evapotranspiración, infiltración y retención de agua, lo que en última instancia afecta el rendimiento del agua de captación (Sánchez et al. 2012). Otros estudios han encontrado que la escorrentía superficial y la producción de agua en las cuencas aumentarán significativamente cuando las áreas de bosques y pastizales se conviertan en superficies impermeables debido a la disminución de la evapotranspiración y la infiltración (Li et al. 2021).

En relación con lo anterior, autores como Costanza et al. 2014 y Elliott et al. (2017) citados por Lovera et al. (2018), señalan que la estructura de la cobertura vegetal y la composición de especies son factores determinantes que influyen en el balance del ciclo hidrológico. Es decir, cuando se remueve la cobertura vegetal, la evapotranspiración y la infiltración disminuye de esta forma se aumenta el volumen de agua superficial, lo que afecta el flujo base a largo plazo. Por el contrario, una mayor cobertura vegetal mantiene los flujos característicos del ciclo del agua.

2.2 El rendimiento hídrico y el cambio climático

La producción de agua o el rendimiento hídrico es un parámetro importante para describir los recursos hídricos regionales. Sin embargo, con la intensificación de las actividades humanas y el cambio climático en los últimos años, ocasionan impactos potencialmente grandes en los procesos hidrológicos de las cuencas y directamente cambian los rendimientos regionales de agua (Anand et al. 2018 citado por Li et al. 2021).

Según Wei et al. (2021), el cambio climático y el uso de la tierra y cobertura terrestre (LULC, Land Use/Land Cover, por sus siglas en inglés) se consideran los principales factores que afectan los cambios espaciotemporales de la producción de agua. Por lo tanto, la evaluación y el análisis de las variaciones espaciotemporales de la producción de agua y los factores impulsores son útiles para lograr una gestión y protección eficaz de los recursos hídricos.

De acuerdo con los autores Li et al. 2007, Ma et al. 2008 y Zhang et al. 2008 citado por Jafarzadeh (2019), los efectos del cambio de la cobertura y uso de la tierra en las cuencas hidrográficas no son ni espacial, ni temporalmente uniformes debido a su acoplamiento con la variabilidad climática. Esto es muy importante al tomar decisiones de gestión de la tierra y el agua para comprender el régimen de producción de agua estacional e interanual debido a los cambios en el uso de la tierra de una cuenca dada a una condición climática específica.

2.3 Importancia del rendimiento hídrico en los ecosistemas

Los seres humanos se benefician enormemente de los recursos hídricos naturales, también conocidos como servicios ecosistémicos hidrológicos (SEH). Sin embargo, estos servicios pueden verse reducidos por el crecimiento de la población, los cambios en el uso de la tierra y el cambio climático. A medida que estos problemas se vuelven más críticos, aumenta la necesidad de cuantificar los recursos hídricos (Minga et al. 2018).

El rendimiento hídrico no solo es una base importante para mantener las funciones clave de los ecosistemas, sino que también interviene en el desarrollo y distribución de la población y en la economía regional. Por lo tanto, el estudio de la producción de agua es útil para comprender la evolución de la función de este servicio ecosistémico y para explorar la relación entre los seres humanos y los recursos hídricos, que tiene una gran importancia para la gestión científica y la utilización racional del recurso hídrico (Yu et al. 2022).

Además, el rendimiento del agua es uno de los índices importantes de la función de regulación de los ecosistemas en las cuencas hidrográficas y juega un papel fundamental en la agricultura, la industria, la pesca, las actividades domésticas, etc. Mientras tanto, la variación temporal espacial del rendimiento del agua también es crucial para la asignación de recursos hídricos entre regiones (Pessacg et al. 2015 y Lu et al. 2020)

2.4 Escenarios de cambio climático según las SSP

Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) son escenarios de transformaciones socioeconómicas globales proyectadas hasta 2100. Dichas trayectorias fueron desarrolladas por en el Sexto Informe de Evaluación (AR6-Assessment Report 6, por sus siglas en inglés) del IPCC para estimar los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en función

no sólo de las distintas políticas climáticas, sino también de posibles cambios demográficos, sociales, tecnológicos y económicos (Comunidad Climática Mexicana [ICM] 2022).

Los escenarios SSP describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico que muestran cómo podría evolucionar el mundo en las décadas siguientes en diferentes aspectos (desarrollo de economías, niveles de desigualdad futuros, el cambio demográfico y tecnológico, entre otros), y qué desafíos suponen esos cambios para la mitigación y la adaptación. Estos aspectos inciden sobre los niveles de emisiones de GEI, y, por lo tanto, generan cambios en el incremento de la temperatura global, que ocasionan cambios en el clima futuro, y que también pueden afectar las alternativas para adaptarse a los impactos del cambio climático (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIIFEN] 2022).

Un aspecto esencial en la conceptualización de las SSP son las narrativas que acompañan a los escenarios y que se describen en dos dimensiones: 1) los desafíos que las condiciones socioeconómicas representan para la adaptación, y 2) los retos que representarían para la mitigación. Con base en ello, se obtienen escenarios que, de manera plausible, representan condiciones socioeconómicas y ambientales (pero no climáticas) y sus desafíos para ejecutar las acciones políticas de mitigación y adaptación (Escoto et al. 2017).

Cuadro 1. Narrativa de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas

Escenario	Narrativa
SSP1 "Sustentabilidad"	Escenario de crecimiento sustentable caracterizado por la equidad social. Estas condiciones favorecen la reducción de emisiones y los niveles de vulnerabilidad al cambio climático. Representa bajos niveles de desafíos de mitigación y adaptación
SSP2 "Intermedio"	Considera las tendencias de crecimiento socioeconómico de acuerdo con patrones históricos e incluye cierto avance en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS); no obstante, la sociedad aún presenta cierto nivel de desigualdad. Tiene un alto desafío para la adaptación.
SSP3 "Fragmentado"	En este escenario, el mundo se encuentra fragmentado en regiones de extrema pobreza y algunos países con riqueza moderada, y no existe la cooperación entre naciones para hacer frente al cambio climático. Tiene un alto desafío para la adaptación y la mitigación.
SSP4 "Desigualdad"	Escenario en donde predomina la desigualdad social. En donde, una proporción del mundo es responsable de las emisiones de GEI y otra parte de la sociedad más pobre es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático. Representa un nivel alto para la adaptación.
SSP5 "Combustibles fósiles"	En este escenario, la tendencia de crecimiento económico continúa y no disminuye ni la intensidad, ni la demanda energética basada en combustibles fósiles. Representa un elevado nivel de desafío para la mitigación.

Fuente: ICM (2022)

La Figura 1, muestra el panorama de las SSP para representar el espacio de desafíos en cinco tipos de escenarios con diferentes retos socioeconómicos de mitigación y adaptación, los cuales pueden variar dependiendo de la combinación de las narrativas de cambio climático (O'Neill et al. 2014 citado por Escoto et al. 2017). Por ejemplo, el SSP1 posee condiciones que reducen las emisiones e incluye medidas efectivas de adaptación y mitigación al cambio climático y se caracterizado por la equidad social. Mientras que el SSP2 es un escenario que posee cierto nivel de desigualdad social e implica retos climáticos intermedios. En cambio, los

escenarios SSP3, SSP4 y SSP5 implican medidas de adaptación y mitigación con mayores desafíos y se aplican medidas menos efectivas para enfrentar el cambio climático en las que predomina la desigualdad social.

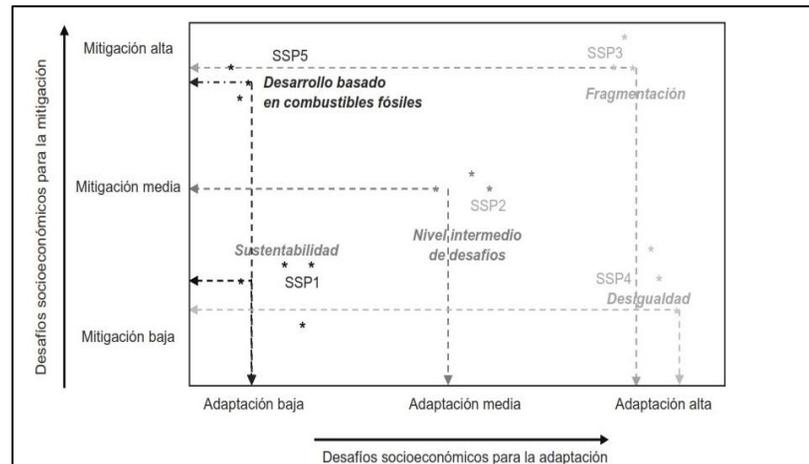


Figura 1. Panorama de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas

2.5 Aplicación de los modelos climáticos globales en Panamá

De acuerdo a la actualización de los escenarios de cambio climático para Panamá utilizados por MIAMBIENTE, la selección de los modelos de cambio climático se basó en las realidades climáticas que mayormente se acercan a la región centroamericana según el estudio de Zhang et al. (2021) citado por Cárdenas (2022). El estudio evaluó el rendimiento de la interdependencia de los Modelos Globales Climáticos (MCG) de sexta fase del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP6) de siete campos impulsores clave a gran escala en ocho dominios CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) conformados por:

- América Central (C-AM)
- América del Norte (N-AM)
- Europa (EURO)
- Sur de Asia (S-AS), Este de Asia (E-AS)
- Australasia (AUS), Medio Oriente África del Norte (MENA)
- Sudeste de Asia (SEA)

Posteriormente, se aplicó un método de evaluación integrada multivariable, el cual evaluó y clasificó la capacidad de los modelos para simular múltiples variables en términos de su media climatológica y variabilidad interanual. Entre los modelos evaluados para la actualización de los escenarios de cambio climático en Panamá, se seleccionaron el FIO-ESM-2-0, MPI-ESM1-2-HR y MPI-ESM1-2-LR debido a su buen desempeño general en todos los dominios.

Modelo Climático FIO-ESM-2-0: este modelo es el Primer Modelo del Sistema Terrestre del Instituto de Oceanografía de China. Posee su versión 2.0 y es parte de sexta fase del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Climáticos (CMIP6).

Modelo Climático MPI-ESM: este es un modelo del Instituto Max Planck (MPI) de Meteorología. Este acopla los componentes para el modelo atmosférico (ECHAM), el modelo

dinámico oceánico (MPIOM, el modelo terrestre (JSBACH) y el modelo biogeoquímico oceánico (HAMOCC). Para la aplicación del modelo MPI-ESM en Panamá, se utilizaron las siguientes configuraciones acopladas:

Modelo acoplado de mayor resolución (HR): tiene una mayor resolución y está configurado con espacios de cuadrícula de 40 km en el océano y 100 km en la atmósfera con el doble de niveles atmosféricos verticales.

Modelo acoplado de baja resolución (LR): es un modelo integral del sistema terrestre, en el sentido de que consiste en modelos de componentes para el océano, la atmósfera y la superficie terrestre. Estos componentes se acoplan a través del intercambio de energía, impulso, agua y gases importantes, como el dióxido de carbono.

En el trabajo de la actualización de los nuevos escenarios de cambio climático para Panamá, según la Visión 2030, 2050 y 2070, la información obtenida a partir de los tres modelos seleccionados y se proyectó siguiendo dos escenarios socioeconómicos, lo cuales son el SSP1-2.6 y SSP5-8.5. La información es expresada espacialmente a una resolución de 1 Km y acotada a nivel nacional y en las seis regiones hidroclimáticas de Panamá (ver Figura 1), permitiendo un análisis más práctico para cada sector (Cárdenas 2022). Las regiones hidroclimáticas de Panamá están comprendidas por:

- Región Caribe Occidental: abarca toda la porción caribeña desde Bocas del Toro, parte de comarca Ngäbe-Bugle, Veraguas y costa abajo de Colón.
- Región Pacífico Occidental: comprende de la provincia de Chiriquí, parte interior de comarca Ngäbe-Bugle, interior y sur de Veraguas y la porción oeste de Herrera y Los Santos.
- Región del Pacífico Central: incluye las porciones este de Los Santos, Herrera, sur de Coclé y sur de gran parte de Panamá Oeste. (Arco Seco).
- Región Central: abarca toda la porción del centro del territorio de las provincias de Coclé, Panamá Oeste, Panamá Metro y resto de la provincia de Colón hasta su frontera con comarca Guna Yala.
- Región Pacífico Oriental: comprende gran parte de la provincia de Panamá este, comarcas Madugandí, Wargandí, las comarcas Emberás Wounaan y Darién.
- Región Caribe Oriental: se refiere solo la porción que cubre la comarca Guna Yala.

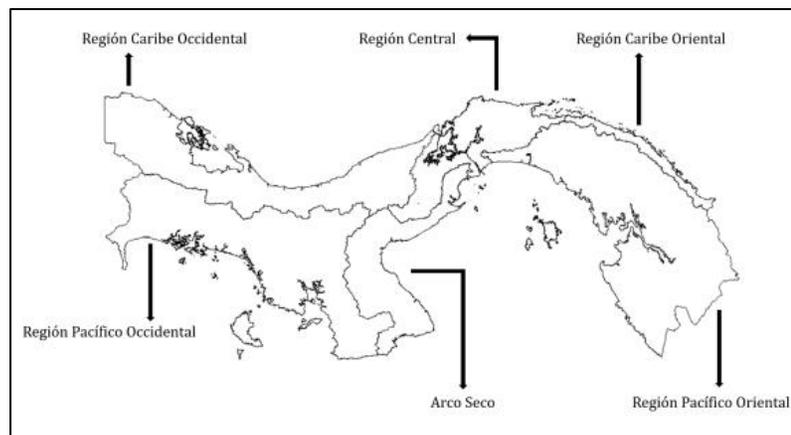


Figura 2. Regiones hidroclimáticas de la República de Panamá

3. Metodología

3.1 Ubicación del área de estudio

La subcuenca del río David forma parte de la cuenca hidrográfica del río Chiriquí N°108. Tiene una extensión territorial aproximada de 292.6 km² y se localiza en la vertiente del Pacífico en la provincia de Chiriquí, República de Panamá, entre las coordenadas UTM 320000 y 380000 E, 900000 y 965000 N. La subcuenca del río David limita al Norte con el Parque Nacional Volcán Barú (PNVB), al Sur con la confluencia del río Chiriquí y los manglares de David en Pedregal, al Este con el distrito de Boquete y al Oeste con el distrito de Boquerón (ver Figura 2).

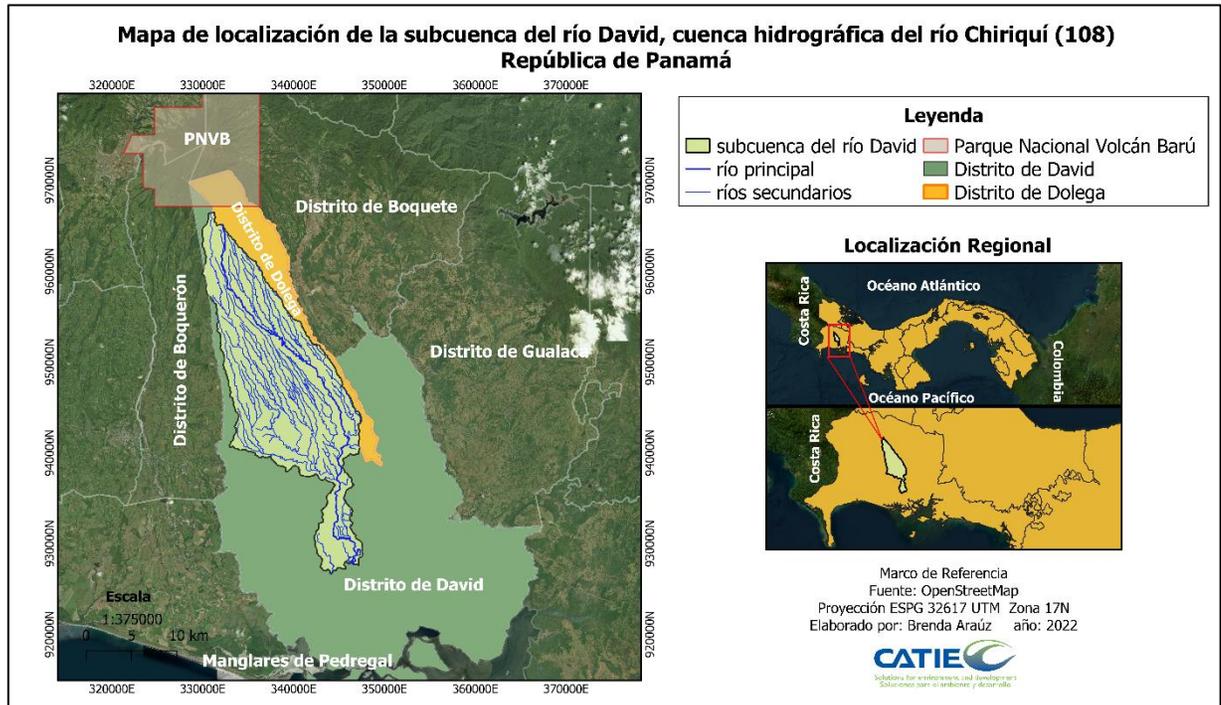


Figura 3. Mapa de localización de la subcuenca del río David

3.2 Descripción del área de estudio

3.2.1 Características biofísicas

Climatología: las condiciones climatológicas de la subcuenca del río David muestran una precipitación media anual de 3,000 mm, distribuida durante todo el año; sin embargo, la mayor actividad pluviométrica se registra entre los meses de mayo a noviembre. Asimismo, los registros muestran una evaporación que alcanza el 60% de la precipitación, y temperatura promedio de 26 °C (Domínguez et al., 2010).

Fisiografía: en la parte alta de la subcuenca del río David, se presentan rangos de pendientes entre los 90 y 60° considerada de tipo accidentada, en la parte media la pendiente oscila entre los 60 y 30° y en la parte baja el rango de pendiente va de los 30 a 0°. Las mayores elevaciones en la parte alta de la subcuenca poseen un rango de altitud de 1,200 a 1,600 msnm. Esto es indicativo de la influencia del Volcán Barú sobre la zona, puesto que el río David nace en las faldas del volcán. En la parte media, la subcuenca del río David posee elevaciones

entre los 1,200 a 800 msnm y en la parte baja con elevaciones entre 10 a 300 msnm (Domínguez et al. 2010).

Hidrografía: el río David como eje principal de la subcuenca posee una longitud aproximada de 53 kilómetros. El máximo caudal mensual promedio en 35 años es de 91.8 m³/s y ocurre en el mes de octubre, mientras que el mínimo es de 3.4 m³/s, se registra en el mes de marzo y el promedio corresponde a 27.5 m³/s (Domínguez, et al 2010). Los principales afluentes de la subcuenca del río David son las microcuencas del río Soles y Majagua, al igual que las quebradas Grande, Clemente, Sábalo y otras (CONADES 2012).

Capacidad agrológica: de acuerdo con la clasificación USDA, la subcuenca del río David tiene el 67.7% de superficie con capacidad agrológica arable, pero posee algunas limitaciones que requieren conservación especial y se concentran las tierras de Clase II, III y IV, correspondiendo a 198.14 Km² de la superficie total. Mientras que el 32.3% de los suelos que abarcan 94.39 Km² poseen capacidades agrológicas de suelos no arables, siendo Clase V, VI y VII. Entre las principales limitaciones que estos suelos presentan son los procesos de erosión severa, estratos delgados con baja capacidad de retención de agua baja fertilidad, presentan drenajes pobres y alta alcalinidad.

Cuadro 2. Capacidad agrológica de las tierras en la subcuenca del río David

Clases	Superficie		Descripción de la capacidad agrológica
	Km ²	%	
II	20.85	7.1	Arable, algunas limitaciones en la selección de las plantas, requiere conservación moderada.
III	121.49	41.5	Arable, severas limitaciones en la selección de las plantas, requiere conservación especial o ambos.
IV	55.80	19.1	Arable muy severas limitaciones en la selección de las plantas o requieren un manejo muy cuidadoso o ambos.
V	24.68	8.4	No arables, poco riesgo de erosión, pero con otras limitaciones, con cualidades para pastos y bosques.
VI	40.28	13.8	No arable con limitaciones severas, con cualidades para pastos bosques y tierras de reserva
VII	29.42	10.1	No arable con limitaciones muy severas; con cualidades para pastos bosques y tierras de reserva.
Total	292.50	100	

Fuente: Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI, 2019). Mapa de la Capacidad Agrológica de Panamá

Suelos: los suelos en la subcuenca del río David son de origen volcánico y se caracterizan por un horizonte superficial negro rico en materia orgánica. La textura de estos suelos es de tipo franco-arenoso, con densidad aparente muy baja y muy permeable. Los suelos se derivan de terrazas fluviales y aluviales recientes. En las planicies o terrenos inundables se encuentran depósitos de aluviones y sedimentos no consolidados como arcilla, limo y arena; y formaciones de rocas sedimentarias del período terciario como lutitas y arenisca (CONADES, 2012).

Ecología: según el mapa de la clasificación de zonas de vida de Holdridge en Panamá, la subcuenca del río David presenta cuatro tipos de zonas de vida conformadas por el Bosque Pluvial Premontano (bp-P) y Bosque muy Húmedo Tropical (bmh-T) en la parte alta, el Bosque muy Húmedo Premontano (bmh-P) en la parte media y el Bosque Húmedo Tropical (bh-T) en la parte baja (Holdridge 1967, ANAM 2010).

3.2.2 Características socioeconómicas

Población: según la división político-administrativa, la subcuenca del río David se ubica en la provincia de Chiriquí entre los distritos Dolega y David. En el distrito de Dolega, la subcuenca comprende de los corregimientos de Potrerillos Abajo, Potrerillos Arriba, Rovira, Dolega cabecera, Los Anastacios, Los Algarrobos y Tinajas. Mientras que, en el distrito de David, la subcuenca abarca al corregimiento de Guacá y parte de los corregimientos de David cabecera y San Carlos. Según el Censo de Población y Vivienda del año 2010 elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC 2010), la población de la subcuenca fue de aproximadamente de 56,958 habitantes y una proyección estimada de 61,339 habitantes al 2020.

Cuadro 3. Población total de la subcuenca del río David

Corregimientos del Distrito de David	Habitantes	
	Año 2010	Año 2020
David (Cabecera)	27,918	30,158
Guaca	2,035	2,232
San Carlos	4,825	5,660
Población total por corregimiento	34,778	38,050
Corregimientos del Distrito de Dolega	Habitantes	
	Año 2010	Año 2020
Dolega (Cabecera)	4,197	4,655
Los Anastacios	3,333	3,285
Los Algarrobos	9,602	10,326
Tinajas	1,576	1,553
Potreros Arriba	1,605	1,566
Potreros Abajo	1,867	1,904
Población total por corregimiento	22,180	23,289
Total de población	56,958	61,339

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC 2010)

Principales sistemas de producción: en la parte alta de la subcuenca del río David, la principal actividad económica es la agricultura basada en la producción de naranja, café, hortalizas, plátano, granos básicos y además se desarrolla la ganadería. La parte media de la subcuenca también posee áreas agrícolas, en donde se produce principalmente granos como arroz, frijoles, maíz, piña y caña de azúcar para suplir la demanda de alimentos a nivel nacional. Mientras que, la parte baja de la subcuenca se caracteriza por la mayor actividad económica compuesta por los comercios, industrias y zonas urbanas, ya que se ubica en la ciudad de David, capital de la provincia de Chiriquí (CONADES 2012).

3.3 Procedimientos metodológicos

3.3.1 Estimación de la disponibilidad actual y futura de agua en las áreas potenciales de rendimiento hídrico

Para estimar la disponibilidad actual y futura del agua en las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) de la subcuenca del río David, se utilizó el Modelo Annual Water Yield (AWY) o rendimiento de agua anual del software InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) o Valoración integrada de servicios ecosistémicos y compensaciones, elaborado por el Proyecto Capital Natural, el Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Fund), The Nature Conservancy y las Universidades de Minnesota y de Stanford en 2007. El modelo AWY estima las contribuciones relativas de agua de las diferentes partes de un paisaje y así ofrece información sobre cómo los cambios en los patrones de uso de la tierra afectan la producción anual del agua superficial y la generación de energía hidroeléctrica, según sea el caso de su aplicación (Natural Capital Project 2022).

Básicamente, el modelo AWY de InVEST determina la cantidad de agua que sale de cada píxel como la precipitación menos la fracción del agua que sufre evapotranspiración. Este modelo no distingue entre la superficie, el subsuelo y el flujo base, sino que asume que todo el rendimiento de agua de un píxel alcanza el punto de interés a través de una de estas vías. Seguidamente, este modelo realiza la suma y promedia el rendimiento del agua al nivel de la cuenca o subcuencas (Natural Capital Project 2022).

Un aspecto importante a destacar sobre el modelo AWY es que los cálculos a escala de píxeles permiten representar la heterogeneidad de los factores impulsores clave en la producción de agua, como el tipo de suelo, la precipitación, el tipo de vegetación, etc. Además, los resultados proporcionados por el mismo son representaciones a escala de píxeles de algunas salidas solo para fines de calibración y verificación, y los mapas a escala de píxeles no se deberían interpretar para comprender los procesos hidrológicos de una cuenca hidrográfica o el área de estudio (Natural Capital Project 2022).



Figura 4. Diagrama conceptual del balance de agua utilizado en el modelo anual de producción de agua

El Modelo Annual Water Yield (AWY) permite conocer el comportamiento del servicio ecosistémico de la producción del agua en un área determinada y muestra geoespacialmente como varía la distribución de la producción de agua en las superficies, además proporciona el valor promedio anual en milímetros (mm) de la producción de agua. Por otro lado, se debe considerar que los cambios en los escenarios del paisaje afectan tanto la temporización de los flujos como la producción anual de agua, y son de particular preocupación cuando se consideran factores como el cambio climático (Natural Capital Project 2022).

3.3.1.1 Ecuaciones del modelo Annual Water Yield (AWY) de InVEST

El rendimiento de agua se refiere a la cantidad de agua producida por unidad de área durante un período determinado. El modelo Annual Water Yield (AWY) se ejecuta en un mapa cuadrulado y es un método de estimación basado la curva de Budyko en el que el rendimiento de agua en un área se obtiene restando la evapotranspiración real total por unidad de área de la precipitación total (Yu et al., 2022)

El modelo AWY estima el rendimiento total anual de agua (Y) para cada cuadrícula (x) de la cuenca de estudio como captación total anual de precipitación (Natural Capital Project 2022), cuya ecuación es la siguiente:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x)$$

Donde:

$AET(x)$: evapotranspiración real anual en cada píxel o celda x (mm/año)

$P(x)$: precipitación anual en el píxel x (mm/año)

$Y(x)$: producción de agua en la escala de píxel o cuadrícula (mm/año)

Para los tipos de uso de suelo/cobertura terrestre o Land Use/Land Cover (LULC) con vegetación, la porción de evapotranspiración del balance hídrico, $AET(x)/P(x)$, se basa en una expresión de la curva de Budyko propuesta por Fu (1981) y Zhang et al. (2004):

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega}$$

Donde:

$PET(x)$: evapotranspiración potencial (mm/año).

(x) : parámetro no físico que caracteriza las propiedades naturales del suelo climático.

La evapotranspiración potencial $PE(x)$ se define como:

$$PET(x) = Kc(\ell x) \cdot ET_0(x)$$

Donde:

$ET_0(x)$: es la evapotranspiración de referencia del píxel x .

$Kc(\ell x)$: es el coeficiente de evapotranspiración de la planta (vegetación) asociado con la LULC ℓx en el píxel x .

$ET_0(x)$: refleja las condiciones climáticas locales, en función de la evapotranspiración de una vegetación de referencia como el pasto o la alfalfa cultivada en ese lugar.

$K_c(\ell x)$: está determinada en gran medida por las características vegetativas del uso del suelo y cobertura terrestre que se encuentran en ese píxel (Allen et al. 1998).

Una forma sencilla de determinar la evapotranspiración de referencia es la ecuación de Hargreaves simplificada, que genera resultados superiores a los de Penman-Montieth cuando la información es incierta (Droogers y Allen, 2002 citado por Natural Capital Project 2022).

$\omega(x)$ es un parámetro empírico que puede expresarse como función lineal de $\frac{AWC * P}{N}$, donde N es el número de eventos de lluvia por año, y AWC es el contenido de agua disponible de la planta volumétrica. Si bien se están realizando más investigaciones para determinar la función que mejor describe los datos globales, el modelo AWY utiliza la expresión propuesta por Donohue et al. (2012) en el modelo InVEST definida de la siguiente forma:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25$$

$AWC(x)$ es el contenido volumétrico (mm) de agua disponible para las plantas. La textura del suelo y la profundidad efectiva del enraizamiento definen $AWC(x)$, que establece la cantidad de agua que puede retenerse y liberarse en el suelo para ser utilizada por una planta. Se estima como el producto de la capacidad de agua disponible para las plantas (PAWC) en el modelo y el mínimo de la profundidad de la capa de restricción de la raíz y la profundidad de las raíces de la vegetación:

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest. layer. depth}, \text{root. depth}) \cdot \text{PAWC}$$

La profundidad de la capa de restricción de la raíz es la profundidad del suelo a la que se inhibe la penetración de la raíz debido a sus características físicas o químicas. La profundidad del enraizamiento de la vegetación se da a menudo como la profundidad a la que se produce el 95% de la biomasa de la raíz de un tipo de vegetación. El contenido de agua disponible para las plantas (PAWC) es la capacidad de agua disponible para la planta, es decir, la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento (Natural Capital Project 2022).

Z es una constante empírica, a veces denominada "factor de estacionalidad", que captura el patrón de precipitación local y características hidrogeológicas adicionales. Se correlaciona positivamente con N, el número de eventos de lluvia por año. El término 1,25 es el valor mínimo de $\omega(x)$, que se puede ver como un valor para suelo desnudo (cuando la profundidad de la raíz es 0), como lo explican Yang et al. 2008 y Donohue et al. 2012 citado por Natural Capital Project (2022), los valores de $\omega(x)$ se limitan a un valor de 5.

Para otros tipos de LULC (aguas abiertas, urbano, humedales), la evapotranspiración real se calcula directamente a partir de la evapotranspiración de referencia $ET_0(x)$ y tiene un límite superior definido por la precipitación:

$$AET(x) = \text{Min}(K_c(\ell x) \cdot ET_0(x), P(x))$$

Donde:

$ET_0(x)$: es la evapotranspiración de referencia.

$K_c(\ell x)$: es el factor de evaporación para cada LULC.

3.3.1.2 Insumos para el modelo Annual Water Yield (AWY)

A continuación, se describen los datos que el software InVEST requiere para el modelo Annual Water Yield (AWY) o rendimiento de agua anual. Estos datos fueron obtenidos, a través de plataformas o servidores de acceso libre y solicitados a instituciones gubernamentales del país para la elaboración de los siguientes productos:

Datos de precipitación

El dato de la precipitación se obtuvo de la plataforma WorldClim, a través de la descarga de 12 archivos ráster en formato GeoTiff (.tif) uno para cada mes del año (enero a diciembre). La información contenida en los archivos ráster de la precipitación se presenta a nivel global a una resolución de 30 segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$) y en unidades de milímetros (mm).

Para el dato de la precipitación en los escenarios de cambio climático del área de estudio, se requirió utilizar los archivos ráster en formato GeoTiff (.tif) de la variable de la precipitación del Modelo FIO-ESM-2-0 para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 de los períodos 2030 y 2050 de la Región del Pacífico Occidental de la República de Panamá. La información contenida en los archivos ráster de la variable de precipitación (PPT) se presenta de forma trimestral y en unidades de milímetros (mm).

Posteriormente, se utilizó el software RStudio para elaborar el mapa ráster de precipitación promedio anual actual y para los escenarios futuros en formato GeoTiff (.tif) con una resolución de 12.5×12.5 píxeles.

Dato de Evapotranspiración Potencial (ET_0)

Para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ET_0) actual y futura, se aplicó la Ecuación de Hargreaves simplificada, utilizando el software RStudio. En el procesamiento de los datos, se generaron los mapas ráster de la temperatura de ambos escenarios y de la radiación solar incidente. La Ecuación de Hargreaves simplificada, requiere los datos de la temperatura media y la radiación solar incidente, cuya fórmula es la siguiente forma:

$$ET_0 = 0.0135 (T_{med} + 17.78) R_s$$

En donde:

ET_0 = evapotranspiración potencial.

T_{med} = temperatura media.

R_s = radiación solar.

Radiación solar incidente (R_s)

El dato de la radiación solar incidente (R_s) se obtuvo de la plataforma WorldClim, a través de la descarga de 12 archivos ráster en formato GeoTiff (.tif) uno para cada mes del año (enero a diciembre). La información contenida en los archivos ráster de la variable R_s se presenta a nivel global a una resolución de 30 segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$) y en unidades de $\text{kJm}^{-2}\text{día}^{-1}$. Para el procesamiento de los archivos ráster de la R_s , se utilizó el software RStudio. Seguidamente, se

elaboró el mapa ráster de la Rs en formato GeoTiff (.tif) con una resolución de 12.5 x 12.5 píxeles. Este mapa ráster de la Rs se empleará para el cálculo de la ET₀ actual y futura en el área de estudio.

Temperatura media actual

A través de la plataforma WorldClim, se descargaron los datos de la variable de la temperatura media en archivos ráster de formato GeoTiff (.tif). Luego, se utilizó el software RStudio para elaborar el mapa ráster de la temperatura media anual en formato GeoTiff (.tif) con una resolución de 12.5 x 12.5 píxeles.

Temperatura media para los escenarios de cambio climático

Para la elaboración de los mapas ráster de la temperatura media anual de los escenarios de cambio climático, se utilizaron los archivos ráster en formato GeoTiff (.tif) de los datos de las temperaturas máximas y mínimas para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 de los períodos 2030 y 2050 del Modelo FIO-ESM-2-0 para la Región del Pacífico Occidental de la República de Panamá. La información contenida en los archivos ráster posee los datos en °C y se presentan de forma trimestral.

En el procesamiento de los archivos ráster de las temperaturas máximas y mínimas de los escenarios de cambio climático, se utilizó el software RStudio. En primer lugar, se realizó el proceso de corte y delimitación del área de estudio. Seguidamente, se realizó la suma de los datos de las temperaturas máximas y se efectuó el mismo proceso con los datos de las temperaturas mínimas para obtener los mapas ráster de la temperatura máxima y mínima anual para cada escenario de cambio climático para los años 2030 y 2050.

Luego, se calculó la temperatura media para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, mediante el promedio de los datos de las temperaturas máximas y mínimas para ambos períodos. Posteriormente, se elaboraron los mapas ráster de las temperaturas medias (°C) para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 correspondientes a los años 2030 y 2050 en formato GeoTiff (.tif) con una resolución de 12.5 x 12.5 píxeles.

Dato de la profundidad de la capa de restricción radical

Debido a la carencia de información sobre este dato específico a nivel nacional y la falta de equipos para realizar muestreos en campo, el dato de profundidad de la capa de restricción radical o root depth para el área de estudio se obtuvo de la plataforma de Información Mundial de Suelos (ISRIC–World Soil Information), la cual posee información de la profundidad del suelo hasta el lecho rocoso (Horizonte R) a 250 metros de resolución y la distribución de las clases de suelo con base en los sistemas de clasificación World Reference Base (WRB) y USDA.

Se descargó un archivo ráster en formato GeoTiff (.tif) con la información del lecho rocoso del hasta 200 centímetros (cm) según la compilación global de observaciones del suelo. Los datos se procesaron en el software RStudio para cortar y delimitar el ráster del Horizonte R y generar un mapa del área de estudio con los valores de la profundidad de restricción de la raíz en milímetros (mm) en formato GeoTiff (.tif) y con una resolución de 12.5 x 12.5 píxeles.

Dato de contenido de agua disponible para las plantas

El contenido de agua disponible para las plantas o plant available water content (PAWC) se define como la diferencia entre la fracción de la capacidad del campo volumétrico y el punto de marchitez permanente. Es la fracción de agua que se puede almacenar en el perfil del suelo y que está disponible para el uso de las plantas [fracción de 0 a 1]. A menudo, el contenido de agua disponible para las plantas está disponible como un valor volumétrico en milímetros (mm) (Natural Capital Project 2022).

El dato de PAWC se obtuvo utilizando los archivos en formato shape (.shp) de los mapas de las texturas de los suelos y de materia orgánica del Estudio de la Zonificación de suelos de Panamá por niveles de nutrientes elaborado por el Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) en el año 2006 y se realizó el procesamiento de la información en el software SPAW (Soil Plant Air Water) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en la versión (6.02.75).

La información de los mapas (.shp) de la textura de los suelos y de materia orgánica se presenta a nivel nacional. En donde, el cuadro de atributos de la capa de las texturas tiene la información de las clases texturales de suelos y el cuadro de atributos de la capa de la materia orgánica (M.O) contiene la información de los niveles y valores críticos de M.O en rangos de 0.0 a 2.9% (Nivel Bajo de M.O), 2.9-5.9% (Nivel Medio de M.O) y mayor a 5.9% (Nivel Alto de M.O).

En el procesamiento de los archivos shape (.shp) de texturas de los suelos y de materia M.O, se utilizó el software QGIS versión (3.20.1) para realizar el corte y delimitación del área de estudio. Seguidamente, se aplicó la herramienta de geoproceso de intersección para extraer los atributos de las entidades superpuestas de la capa de entrada y de superposición.

En este proceso, se intersecaron las capas de las texturas de los suelos y materia orgánica de la subcuenca del río David para obtener una nueva capa en formato (.shp) denominada "Textura y M.O", la cual posee la combinación espacial de los atributos que conforman ambas capas. Luego, se procedió a unir los polígonos que tenían los mismos códigos de la capa de intersección, a través de la herramienta de geometría de multiparte a monoparte y se calculó el área de los polígonos resultantes.

Uso del software SPAW para obtener el dato de agua disponible para las plantas

La metodología propuesta para la obtención del dato del contenido de agua disponible para las plantas, consistió en utilizar el modelo de Soil Water Characteristic del software SPAW, en donde a partir de los datos de las texturas de los suelos y del porcentaje de materia orgánica del área de estudio se obtuvo el contenido de agua disponible en el suelo en centímetros (cm). Este procedimiento se realizó introduciendo los datos de cada clase textural del suelo y porcentaje de M.O al módulo de Soil Water Characteristic.

Posteriormente, editando la capa de Textura y M.O, se creó una columna denominada "Agua disponible" y se colocó el valor correspondiente determinado por SPAW. Luego, se transformó la unidad de cm a mm de agua disponible, debido a que es la unidad de medida requerida por el modelo AWY para la estimación de la producción de agua en un paisaje. Por

último, se elaboró el mapa ráster del contenido de agua disponible para las plantas del área de estudio. En este proceso, se seleccionó el cuadro de atributos de la capa (.shp) de Textura y M.O la columna de "Agua disponible" y se convirtió en una capa ráster, a través del software ArcGIS.

Dato de uso de la tierra y cobertura terrestre

El modelo Annual Water Yield requiere un ráster de uso de la tierra y cobertura terrestre o land use/land cover (LULC) para cada píxel, donde cada entero único representa una clase diferente de LULC y todos los valores en este ráster deben de tener entradas correspondientes en cuadro de los atributos biofísicos. La categorización de los tipos de uso de la tierra depende del modelo y de la cantidad de datos disponibles para cada clase de LULC (Natural Capital Project 2022).

El dato LULC, se obtuvo del archivo en formato shape (.shp) del mapa de cobertura y uso de la tierra de Panamá elaborado por MIAMBIENTE en el año 2021. En el procesamiento de los datos, se utilizó el software ArcGIS para realizar el corte de la capa y delimitar el área de estudio. Esta nueva capa shape (.shp) se denominó "LULC", la cual contiene la información de las diferentes categorías uso del suelo y cobertura terrestre en la subcuenca del río David.

Después, se agruparon las diferentes clases de "LULC" dentro de su misma categoría y se enumeraron en números enteros según la cantidad de clases "LULC" existentes en el área de estudio. Seguidamente, se convirtió la capa shape en una capa ráster y se reclasificaron los píxeles del mapa para otorgar el valor "lucode" a cada categorización de las coberturas en la subcuenca del río David requerido en el cuadro de atributos biofísicos.

Dato de cuenca o subcuenca

Se utilizó un mapa en formato shape (.shp) de la delimitación de la subcuenca del río David con el dato de la superficie o área en kilómetros cuadrados (km²).

Dato del cuadro de atributos biofísicos

El modelo AWY del software InVest requiere utilizar un cuadro de atributos biofísicos en formato (.csv) o valor separado por comas que contiene la información del modelo de cada una de las clases de uso de la tierra y cobertura terrestre en el ráster LULC. Todas las clases LULC en la capa ráster deberán tener el mismo valor lucode en este cuadro. Cada fila es una clase de LULC y las columnas deben nombrarse y definirse de la siguiente manera: Lulc_desc, lucode, root_depth, Kc y LULC_veg (Natural Capital Project 2022)

El Manual de usuarios del software InVEST recomienda realizar una revisión bibliográfica para buscar los valores del cuadro biofísico que sean específicos del área en la que está trabajando. Si no están disponibles, se deben buscar valores que se correspondan lo más estrechamente posible con los mismos tipos de cobertura terrestre, suelo y clima. Para el desarrollo de la investigación, se utilizó la información de los valores del Kc (coeficiente de evapotranspiración), root_depth (profundidad de raíz) y Lulc_desc (descripción del uso del suelo y cobertura terrestre) del cuadro biofísico del compendio de ejemplos de módulo de Annual Water Yield de InVest y también de artículos científicos para la búsqueda de estos datos.

Para la creación del cuadro biofísico de la subcuenca del río David, se editó el cuadro de atributos del mapa ráster "LULC" y se crearon las columnas de *Lucl_desc*, *lucode*, *root_depth*, *Kc* y *LULC_veg*. Consecutivamente, se agregaron los valores correspondientes a cada una de las clases LULC en las columnas según la información disponible de la siguiente forma:

- *lucode* (requerido): entero único para cada clase LULC (por ejemplo, 1 bosque, 2 pastizales, 3 cuerpos de agua, etc.). Cada valor en el mapa LULC debe tener un valor de *lucode* correspondiente en el cuadro biofísico.
- *LULC_desc* (opcional): es el nombre descriptivo de la clase de uso del suelo/cobertura del suelo.
- *LULC_veg* (requerido): los valores deben ser 1 para el uso de la tierra con vegetación y 0 para todos los demás usos de la tierra, incluidos humedales, centros urbanos, cuerpos de agua, etc.
- *root_depth* (requerido): la profundidad máxima de la raíz para las clases de uso del suelo con vegetación, dada en milímetros enteros. Para usos de la tierra donde no se usa la curva genérica, no se necesita profundidad de enraizamiento. En estos casos, el espacio de profundidad de enraizamiento se ignora y se puede establecer como un valor como -1 para indicar que el campo no se utiliza.
- *Kc* (requerido): es el coeficiente de evapotranspiración de la planta para cada clase LULC utilizado para calcular la evapotranspiración potencial mediante el uso de características fisiológicas de la planta para modificar la evapotranspiración de referencia. El coeficiente de evapotranspiración es un decimal en el rango de 0 a 1.5.

Dato de Parámetro Z

El parámetro Z es una constante empírica, a veces denominada factor de estacionalidad, que capta el patrón de precipitación local y las características hidrogeológicas adicionales (Natural Capital Project 2022). Es el valor de punto flotante del orden de 1 a 30 correspondiente a la distribución estacional de la precipitación. Para el área de estudio, se seleccionó el orden 30, debido a que es el parámetro utilizado para la región del trópico.

3.3.1.3 Estimación de la disponibilidad de la producción de agua actual y futura

En el desarrollo de la investigación, se aplicó el modelo Annual Water Yield (AWY) para generar estimaciones geospaciales de la producción promedio anual de agua en el área de estudio y a partir de los resultados obtenidos realizar el análisis la disponibilidad de agua actual y futura de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) de la subcuenca del río David. En Cuadro 4 y Figura 5 se resume los parámetros de entrada requeridos por el modelo AWY, detallados en la sección 3.3.1.2.

Para la estimación del rendimiento hídrico, se utilizaron los parámetros presentados en la Figura 5, a diferencia de las variables de la precipitación media anual y evapotranspiración potencial media anual, las cuales fueron proyectadas hacia horizontes futuros, utilizando los datos del Modelo FIO-ESM-2-0 para los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 (escenario de desarrollo sostenible) y SSP5-8.5 (escenario basado en combustibles fósiles) de los períodos 2030 y 2050 para la Región del Pacífico Occidental de la República de Panamá solicitados a la Dirección de Cambio Climático de MIAMBIENTE.

Cuadro 4. Parámetros de entrada del modelo AWY

Orden	Parámetros	Formato y resolución	Fuente de datos
1	Precipitación promedio anual (mm/año)	GeoTiff (.tif) 12.5 x 12.5 píxeles	Plataforma WorldClim https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html
2	Evapotranspiración Potencial promedio anual (ET ₀) (mm/año)	GeoTiff (.tif) 12.5 x 12.5 píxeles	Plataforma WorldClim https://www.worldclim.org/data/index.html
3	Profundidad de la capa de restricción radical (mm)	GeoTiff (.tif) 12.5 x 12.5 píxeles	Plataforma World Soil Information https://data.isric.org/geonetwork/srv/spa/catalog.se/arch#/metadata/bfb01655-db81-4571-b6eb-3caae86c037a
4	Agua disponible para las plantas/ Plant available water content (PAWC) (mm)	GeoTiff (.tif) 12.5 x 12.5 píxeles	Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) http://www.idiap.gob.pa/ Modelo Soil Water Characteristic del software SPAW https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492&modecode=80-42-05-10
5	Uso de la tierra y cobertura terrestre Land Use/ Land Cover (LULC)	GeoTiff (.tif) 12.5 x 12.5 píxeles	Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE). Sistema Nacional de Información Ambiental de Panamá (SINIA). Cobertura boscosa y uso de suelo. (2021) https://www.sinia.gob.pa/index.php/extensions/datos-abiertos-y-geoservicios
6	Delimitación de la subcuenca (km ²)	Shape (shp.)	SIG ArcGis
7	Tabla biofísica	Tabla de texto (.csv)	Guía de usuario de InVEST https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest
8	Parámetro Z	----	Guía de usuario de InVEST https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest

Se elaboraron los mapas de cada parámetro a una resolución de 12.5 x 12.5 píxeles con el fin de obtener la misma resolución, de tal manera que fuera comparativo el rendimiento hídrico actual y futuro. Para el escenario actual, se descargaron los datos de precipitación, temperatura y radiación solar media anual de la plataforma WorldClim a una resolución de 30 segundos (~1 km²). En los escenarios futuros, se utilizaron los datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas de los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del Modelo FIO-ESM-1-2 para los años 2030 y 2050 a una resolución de 1 km. Estos datos fueron obtenidos de la actualización de los ECC para Panamá analizados por la Dirección de Cambio Climático (DCC) de MIAMBIENTE, cuyas proyecciones futuras se derivan del CMIP6 disponible en WorldClim.

La Figura 5 presenta los insumos requeridos por el modelo AWY para estimar la producción agua del área de estudio, los cuales incluyen como parámetro de entrada la utilización de mapas ráster en formato GeoTiff (.tif) de las variables de precipitación promedio anual (mm/año), evapotranspiración potencial promedio anual (mm/año), uso y cobertura de la tierra, contenido de agua disponible para las plantas (mm), profundidad del suelo (mm) y un mapa en formato shape (shp.) de los límites de la subcuenca y el valor del parámetro Z.

Además, de un cuadro de atributos biofísicos de los valores de Kc y profundidad de raíz en formato (.csv) (Cuadro 5).

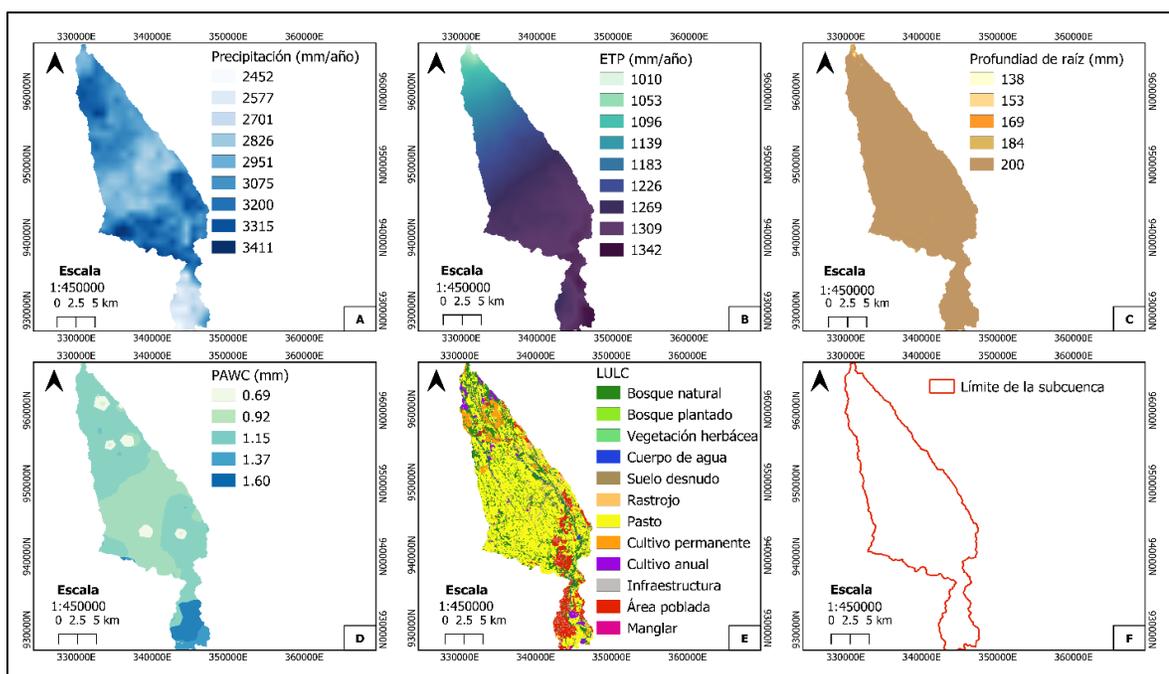


Figura 5. Parámetros de entrada del modelo Annual Water Yield de INVEST

- a) Precipitación anual promedio (mm/año), b) Evapotranspiración Potencial (ETP) anual promedio (mm/año), c) Profundidad de raíz (mm), d) Contenido de agua disponible para las plantas (PAWC), e) Uso del suelo y cobertura terrestre (LULC) y f) Límite de la subcuenca

El Cuadro 5 presenta los atributos biofísicos del uso del suelo y tipo de cobertura terrestre (LULC) del área de estudio, el cual contiene el nombre descriptivo de cada clase de LULC_desc, la profundidad máxima de raíz (root_depth) para cada una de las clases de uso de la tierra con vegetación, el coeficiente de evapotranspiración (Kc) de la planta para cada clase de LULC y el LULC_Veg definido por valores de 1 para el uso de la tierra con vegetación y 0 sin vegetación.

Cuadro 5. Atributos biofísicos de la subcuenca del río David

lucode	LULC_desc	root_depth (mm)	Kc	LULC_Veg
1	Bosque natural	7,000	1	1
2	Bosque plantado	7,000	1	1
3	Vegetación herbácea	1,500	0.7	1
4	Cuerpo de agua	500	1	0
5	Suelo desnudo	500	0.2	0
6	Rastrojo y vegetación arbustiva	2,000	0.5	1
7	Pasto	1,000	0.85	1
8	Cultivo permanente	1,000	0.6	1
9	Cultivo anual	900	0.6	1
10	Infraestructura	0	0.3	0
11	Área poblada	10	0.1	0
12	Manglar	7,000	1	1

Se utilizó la versión 3.12.1 del software InVEST y el modelo AWY proporciona como salidas: un archivo de texto (.txt) con valores del rendimiento hídrico o water yield en lámina en milímetros (mm) y en volumen (m³) a nivel de cuencas o subcuencas hidrográficas y tres archivos en formato (.tif) de la fracción estimada de evapotranspiración real de la precipitación (evapotranspiración real / precipitación) por píxel, la evapotranspiración real (ETR) por píxel y la estimación del rendimiento hídrico por píxel.

3.3.1.4 Producción del rendimiento hídrico (PRH)

Para representar la distribución superficial de las APRH, se realizó la reclasificación de los píxeles de los mapas ráster obtenidos de la estimación del rendimiento hídrico obtenido del modelo AWY para el escenario actual y futuro de cambio climático (SSP1-2.6 y SSP5-8.5) correspondientes a los años 2030 y 2050. Posteriormente, las APRH se dividieron en cuatro categorías de producción de rendimiento hídrico (PRH) representadas por: 1) baja PRH (<1,500 mm/año, 2) media PRH (1,500 a 2,000 mm/año), 3) alta PRH (2,000 a 3,000 mm/año) y 4) muy alta PRH (>3,000 mm/año) y se realizó el cálculo de la superficie de cada una de las categorías en hectáreas.

3.3.2 Determinación de los cambios, pérdidas y ganancias de áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) para el escenario actual y futuro de cambio climático

En el análisis de las pérdidas y ganancias de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH), se realizó la comparación de los cambios en las categorías de la producción de rendimiento hídrico (PRH) del escenario actual con respecto a los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los años 2030 y 2050.

Los "cambios" indican las zonas en las que se proyecta un cambio de categoría de PRH a futuro, es decir, que una categoría de PRH pasará a otra categoría de PRH. Mientras que los "no cambios" son las zonas que no presentarán cambios de categoría de PRH, en donde se mantendría la misma categoría de PRH del escenario actual al escenario futuro de cambio climático.

Por lo tanto, la "pérdida" de las áreas potenciales de rendimiento hídrico significa la disminución en la distribución de la superficie de las categorías de PRH presentes en el escenario actual y que, por lo tanto, tendrán una reducción del área de extensión superficial para los escenarios de cambio climático. Por otra parte, la "ganancia" de áreas potenciales de rendimiento hídrico es el aumento en la distribución de la superficie de las categorías de PRH dentro del área de estudio para los escenarios futuros de cambio climático.

Para determinar los cambios del rendimiento hídrico, se utilizó RStudio en el procesamiento de los mapas ráster del escenario actual y futuro de cambio climático clasificados según las cuatro categorías de producción de rendimiento hídrico (PRH). En primer lugar, se realizó la operación de resta de los píxeles de ambas capas, señalándose como "cambios", las áreas donde la categorización de PRH es diferente de cero y se asignó un valor de "1" y se denominaron como "no cambios", las áreas que mantienen la categorización de PRH del escenario actual al futuro, es decir, cuya resta de píxeles sea igual a cero y se asignó como "NA" o sin datos (ver Cuadro 6).

Luego, se elaboró una capa ráster denominada “cambios PRH”, la cual permite visualizar las áreas en donde se presentan los cambios en la categorización de la producción de rendimiento hídrico al comparar la PRH en el escenario actual con los escenarios futuros de cambio climático. De esta forma, se representaron los cambios y no cambios que se proyectan según los escenarios de cambio climático para cada una de las categorías de producción de rendimiento hídrico identificadas como: 1) baja PRH, 2) media PRH, 3) alta PRH y 4) muy alta PRH. Por último, se graficó por hectáreas (ha) la pérdida y ganancia de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH).

Cuadro 6. Ejemplo de la reclasificación los pixeles de la capa de cambios de producción de rendimiento hídrico (PRH)

Producción de agua en el escenario actual			Producción de agua en los escenarios futuros de cambio climático			Cambios PRH		
1	2	3	1	2	4	NA	NA	1
4	3	4	2	3	2	1	NA	1
3	4	1	3	1	1	NA	1	NA
2	1	4	4	1	3	1	NA	1

Cálculo de pérdidas y ganancias de las APRH

En el cálculo de las pérdidas de las APRH se aplicó la función de máscara de RStudio, la cual permite extraer únicamente los valores contenidos en las celdas de una capa ráster y no así los valores de “NA” o sin datos, los cuales se consideran fuera de la máscara. Se utilizó como parámetro de entrada, la capa ráster del rendimiento hídrico en el escenario actual y la capa ráster de cambios PRH como máscara. Mientras que, para obtener las ganancias de las áreas potenciales de rendimiento hídrico, se utilizó como parámetro de entrada la capa ráster del rendimiento hídrico de los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los años 2030 y 2050 respectivamente y la capa ráster de cambios PRH como máscara. (ver Cuadro 7 y Cuadro 8).

Cuadro 7. Ejemplo de pérdida de áreas potenciales de rendimiento hídrico (PRH)

Producción de rendimiento hídrico (PRH) en el escenario actual			Cambios PRH			Pérdida de PRH		
1	2	3	NA	NA	1	NA	NA	3
4	3	4	1	NA	1	4	NA	4
3	4	1	NA	1	NA	NA	4	NA
2	1	4	1	NA	1	2	NA	4

Cuadro 8. Ejemplo de ganancia de áreas potenciales de rendimiento hídrico (PRH)

Producción de rendimiento hídrico (PRH) en escenario futuro de cambio climático			Cambios PRH			Ganancia de PRH		
1	2	4	NA	NA	1	NA	NA	4
2	3	2	1	NA	1	2	NA	2
3	1	1	NA	1	NA	NA	1	NA
4	1	3	1	NA	1	4	NA	3

Por ejemplo, si un área dentro del territorio de la subcuenca del río David posee una categoría de "alta PRH" en el escenario actual y pasará a una categoría de "media PRH" en el escenario futuro de cambio climático. Entonces, habrá una pérdida de superficie de la categoría de alta PRH presente en el escenario actual, pero ocurrirá una ganancia de superficie para la categoría de media PRH en el escenario futuro.

3.3.3 Líneas de acción para el manejo, gestión y protección de las APRH frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río David

Se realizará un Diagnóstico Rural Participativo (DRP) con la finalidad de la formulación de lineamientos de acción para el manejo, gestión y protección de las APRH frente al cambio climático a través desarrollo de un Análisis FODA, el cual involucrará la participación de actores clave como las autoridades locales, instituciones gubernamentales, productores agropecuarios, organizaciones no gubernamentales (ONG), productores agropecuarios, el Comité de la cuenca hidrográfica del río Chiriquí (108), Juntas Administradoras de Acueductos Rurales (JAAR's), empresa privada, líderes comunitarios y sociedad civil vinculados en la gestión de los recursos naturales, especialmente de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en el área de estudio.

En el caso específico de la investigación, el Análisis FODA de tipo cualitativo y cuantitativo servirá para identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de los impactos del cambio climático e intervención antropogénica en la subcuenca del río David. Para el desarrollo del DRP, se organizó un taller de forma presencial con los actores claves identificados en la subcuenca del río David. Entre los equipos y materiales que se requeridos para el levantamiento de la información del DRP se encuentran: medios audiovisuales (computadora y proyector) y un formulario en formato Excel para el desarrollo del Análisis FODA.

En primer lugar, se presentarán los mapas temáticos resultantes del análisis de la estimación de la disponibilidad de agua actual y futura de las APRH de la subcuenca del río David que fueron obtenidos a partir de la aplicación del modelo de Anual Water Yield o de rendimiento hídrico anual del software InVEST. El uso de los mapas temáticos facilitará la realización del DRP, debido a que los actores clave podrán observar el escenario actual y la proyección futura de la producción de agua, según los datos del Modelo FIO-ESM-2-0 para la

Región del Pacífico Occidental de la República de Panamá de los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los años 2030 y 2050.

Es importante indicar que, en la investigación se utilizará un formulario en formato Excel para el desarrollo del Análisis FODA, el cual permitirá para recopilar la información, a través de matrices de evaluación de los factores internos y externos del FODA. Posteriormente se realizará una gráfica para la interpretación del Análisis FODA y proponer lineamientos para el manejo, gestión y protección de las APRH de la subcuenca del río David.

3.3.3.1 Análisis FODA

Según López y Flores (2013), el Análisis FODA se orienta principalmente al análisis y resolución de problemas y se lleva a cabo para identificar y analizar las fortalezas y debilidades de la organización, así como las oportunidades (aprovechadas y no aprovechadas) y amenazas reveladas por la información obtenida del contexto externo. Las fortalezas y debilidades se refieren a la organización y sus productos, mientras que las oportunidades y amenazas son factores externos sobre los cuales la organización no tiene control alguno.

Variables del Análisis FODA

- A) Fortalezas: es algo en lo que la organización es competente, se traduce en aquellos elementos o factores que estando bajo su control, mantiene un alto nivel de desempeño, generando ventajas o beneficios presentes y claro, con posibilidades atractivas en el futuro.
- B) Debilidades: significa una deficiencia o carencia, algo en lo que la organización tiene bajos niveles de desempeño y por tanto es vulnerable, denota una desventaja ante la competencia, con posibilidades pesimistas o poco atractivas para el futuro. Constituye un obstáculo para la consecución de los objetivos, aun cuando está bajo el control de la organización. Al igual que las fortalezas éstas pueden manifestarse a través de sus recursos, habilidades, tecnología, organización, productos, imagen, etc.
- C) Oportunidades: son aquellas circunstancias del entorno que son potencialmente favorables para la organización y pueden ser cambios o tendencias que se detectan y que pueden ser utilizados ventajosamente para alcanzar o superar los objetivos. Las oportunidades pueden presentarse en cualquier ámbito, como el político, económico, social, tecnológico, etc., dependiendo de la naturaleza de la organización.
- D) Amenazas: son factores del entorno que resultan en circunstancias adversas que ponen en riesgo el alcanzar los objetivos establecidos, pueden ser cambios o tendencias que se presentan repentinamente o de manera paulatina, las cuales crean una condición de incertidumbre e inestabilidad en donde la empresa tiene muy poca o nula influencia.

Fase I

Para iniciar el Análisis FODA, se abordará el problema central a partir de la técnica "Lluvia de ideas" con la finalidad de recibir todas las propuestas y opiniones que aporten los miembros del grupo sobre las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la organización eliminando los comentarios y discusiones personales, listándolas y numerándolas en un lugar visible para los integrantes del grupo (pizarrón o rotafolio) a fin de que posteriormente puedan ser valoradas (López y Flores, 2013).

En la fase I, la recolección de la información que será brindada por los actores claves en la lluvia de ideas, se colocarán en la matriz del formulario de Excel para el Análisis FODA y se debe desarrollar en el siguiente orden: 1) Fortalezas; 2) Oportunidades; 3) Amenazas; y 4) Debilidades. Las Fortalezas y Oportunidades se identificarán como un factor positivo (+) y las Debilidades y Amenazas como un factor negativo (-). Se deben identificar las variables internas y luego las externas para agrupar las premisas dentro de su misma categoría.

Cuadro 9. Matriz del análisis FODA

Análisis	Factores positivos (+)		Factores negativos (-)	
Análisis Interno	F	Fortalezas	D	Debilidades
	F1		D1	
	F2		D2	
	F3		D3	
Análisis Externo	O	Oportunidades	A	Amenazas
	O1		A1	
	O2		A2	
	O3		A3	

Fase II

En la fase II, se desarrollarán las Matrices de Evaluación para la valoración de los factores internos y externos del Análisis FODA, en donde se utilizará una escala con valores del 1 a 5 según el nivel de importancia, impacto, tendencia y urgencia de las fortalezas, oportunidades, amenazas y debilidades (ver Cuadro 10 y 11). es pertinente acotar que esta será una valoración porcentual y debe ser apreciada bajo el enfoque sistémico y de visión compartida entre los actores clave y el investigador o técnico para aplicar esta metodología.

En el formulario de Excel del Análisis FODA se realizará la multiplicación de los valores obtenidos en las matrices de evaluación de los factores externos e internos y se efectuará la sumatoria del puntaje total. Luego se calculará el porcentaje de las fortalezas, oportunidades, amenazas y debilidades y se generará una gráfica del Análisis FODA. Posteriormente, se calculará el índice de situación (IS) para determinar si la problemática analizada se encuentra en una condición muy favorable, favorable, equilibrada, desfavorable o muy desfavorable (ver Anexo 6). Para la obtención del índice de situación, se utiliza la siguiente formula:

$$IS: ((\text{oportunidades} + \text{fortalezas}) - (\text{debilidades} + \text{amenazas})) / ((\text{fortalezas} + \text{oportunidades}) + (\text{debilidades} + \text{amenazas})) \times 2$$

Cuadro 10. Escala de valoración de los factores internos y externos del análisis FODA

Valor	Importancia	Impacto	Tendencia	Urgencia
1	Sin importancia	Muy débil	Malo	No urgente
2	Menos importante	Débil	Deficiente	No urgente
3	Importante	Significativo	Se mantiene	Medios urgentes
4	Muy importante	Fuerte	Mejora urgente	Urgente
5	Totalmente importante	Muy fuerte	Mucha mejora	Muy urgente

Cuadro 11. Matriz de evaluación de los factores internos

Evaluación	Tipo	Nº	Descripción	Importancia	Impacto	Tendencia	Puntuación
Factores positivos (+)	Fortalezas	F1					
Factores positivos (+)	Fortalezas	F2					
Factores positivos (+)	Fortalezas	F3					
Factores negativos (-)	Debilidades	D1					
Factores negativos (-)	Debilidades	D2					
Factores negativos (-)	Debilidades	D3					

Cuadro 12. Matriz de evaluación de los factores externos

Evaluación	Tipo	Nº	Descripción	Importancia	Impacto	Tendencia	Puntuación
Factores positivos (+)	Oportunidades	O1					
Factores positivos (+)	Oportunidades	O2					
Factores positivos (+)	Oportunidades	O3					
Factores negativos (-)	Amenazas	A1					
Factores negativos (-)	Amenazas	A2					
Factores negativos (-)	Amenazas	A3					

Fase III

En la fase III, se plantearán las estrategias de solución del problema central con base en los factores internos y externos que fueron señalados en la Matriz del Análisis FODA. Las estrategias se dividirán en 4 tipos: Estrategias Ofensivas (F-O), Estrategias Defensivas (F-A), Estrategias de Reorientación (D-O) y Estrategias de Supervivencia (D-A). Las estrategias serán formuladas entre los actores clave y el investigador, quien guiará el proceso de recopilación, ordenación y análisis de las diversas estrategias que serán mencionadas por el grupo de trabajo.

Al formular las Estrategias Ofensivas (F-O), se deben seleccionar aquellas "Fortalezas" y "Oportunidades" que guarden relación entre sí mismas y tienen que responder a la pregunta de ¿Cómo utilizar una fortaleza para explotar una oportunidad?. Mientras que al plantear las Estrategias Defensivas (F-A), se deben aprovechar las "Fortalezas" para minimizar las "Amenazas" y tienen que responder a la pregunta de ¿Cómo podemos usar fortaleza para minimizar o neutralizar una amenaza?.

Las Estrategias de Reorientación (DO), están dirigidas a buscar soluciones que conviertan las "Debilidades" en "Oportunidades" y tienen que resolver la siguiente pregunta ¿Cómo corregir una debilidad para aprovechar una oportunidad?. Por otro lado, las Estrategias de Supervivencia (D-A), se orientan a identificar soluciones para contrarrestar la "Debilidades" y disminuir el impacto de las "Amenazas" y estas deben responder a la pregunta de ¿Cómo vamos a trabajar una debilidad para minimizar el efecto de una amenaza?.

Cuadro 13. Matriz de análisis FODA cruzado

Factores externos		Factores internos		O	Oportunidades	A	Amenazas
				O1		A1	
				O2		A2	
				O3		A3	
F	Fortalezas	FO	Estrategias Ofensivas (F-O) ¿Cómo utilizar una fortaleza para explotar una oportunidad?	FA	Estrategias Defensivas (F-A) ¿Cómo podemos usar fortaleza para minimizar o neutralizar una amenaza?		
F1							
F2							
F3							
D	Debilidades	DO	Estrategias de Reorientación (D-O) ¿Cómo corregir una debilidad para aprovechar una oportunidad?	DA	Estrategias de Supervivencia (D-A) ¿Cómo vamos a trabajar una debilidad para minimizar el efecto de una amenaza?		
D1							
D2							
D3							

Fase IV

Se propondrán las líneas de acción para el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico sobre los efectos del cambio climático, a partir de las estrategias de solución del problema central obtenidas de la Matriz de los factores internos y externos denominado como "Matriz de análisis FODA cruzado". Esta fase del Análisis FODA, tiene como objetivo plantear planes de acción, a partir de la formulación de Estrategias Ofensivas (F-O), Estrategias Defensivas (F-A), Estrategias de Reorientación (D-O) y Estrategias de Supervivencia (D-A) formuladas por los actores claves y el investigador. Posteriormente, los planes de acción se agruparán en corto, mediano y largo plazo, según el enfoque de cuenca hidrográfica y las posibles actividades para cada una de las estrategias.

4. Resultados

4.1 Rendimiento hídrico en el escenario actual y futuro de cambio climático

Los resultados del modelo Annual Water Yield (AWY) del software InVEST indican que la oferta de la producción de agua o el rendimiento hídrico (RH) promedio anual en la subcuenca del río David para el escenario actual es de 2,104.98 mm/año, producida por una precipitación (PPT) media anual de 3,034.39 mm/año y una evapotranspiración real (ETR) media anual de 929.46 mm/año.

En el escenario SSP1-2.6 del período 2030, se estimó que el área de estudio podría tener un rendimiento hídrico promedio anual de 2,053.07 mm/año, resultante de una precipitación media anual de 3,001.82 mm/año y una evapotranspiración real (ETR) media anual de 948.82 mm/año. A comparación del escenario SSP1-2.6 del período 2050, en donde el rendimiento hídrico promedio anual de agua calculado es de 2,153.72 mm/año, con una precipitación media anual de 3,107.62 mm/año y una evapotranspiración real (ETR) media anual de 953.98 mm/año.

Para el escenario SSP5-8.5 del período 2030, se obtuvo que el rendimiento hídrico promedio anual será de 2,028.97 mm/año, producto de una precipitación media anual de 2,980.05 mm/año y una evapotranspiración real (ETR) media anual 951.18 mm/año. Mientras que en el escenario SSP5-8.5 del período 2050, el área de estudio presentará un rendimiento hídrico promedio anual estimado de 2,017.35 mm/año, con valores de precipitación de 2,983.18 mm/año y una evapotranspiración real (ETR) media anual de 965.95 mm/año.

Cuadro 14. Rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración real promedio anual de la subcuenca del río David en el escenario actual y futuro

Escenarios	RH (mm/año)	Dif. RH	Var. RH (%)	PPT (mm/año)	Dif. PPT	Var. PPT (%)	ETR (mm/año)	Dif. ETR	Var. ETR (%)
Escenario actual	2,104.98	-	-	3,034.39	-	-	929.46	-	-
SSP 1-2.6 año 2030	2,053.07	-51.91	-2.5	3,001.82	-32.57	-1.1	948.82	19.36	2.1
SSP 1-2.6 año 2050	2,153.72	48.74	2.3	3,107.62	73.23	2.4	953.98	24.52	2.6
SSP5-8.5 año 2030	2,028.97	-76.01	-3.6	2,980.05	-54.34	-1.8	951.18	21.72	2.3
SSP5-8.5 año 2050	2,017.35	-87.63	-4.2	2,983.18	-51.21	-1.7	965.95	36.49	3.9

La estimación del rendimiento hídrico es bastante sensible a las variables climáticas de la precipitación y evapotranspiración. Los cambios de estas variables dependen de los Modelos climáticos globales (MCG), escenarios y años de proyección (Hamel y Guswa 2015 citado por Minga 2018). En la actualización de los ECC para Panamá basados en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del IPCC, el modelo climático global FIO-ESM-2-0 proyecta el menor valor de los cúmulos de precipitaciones máximas, promedios y mínimas. En donde, se determinó que las lluvias máximas se registran sobre la parte occidental del país, entre las provincias de Chiriquí, Bocas del Toro y Veraguas en este modelo (Cárdenas 2022).

Para el área de estudio, en el escenario más optimista o el SSP1-2.6, la PPT podría disminuir y la ETR aumentar al año 2030, mientras que en el año 2050 la PPT y ETR podrían aumentar. Sin embargo, en el escenario más pesimista, es decir, el SSP5-8.5, se observa que la PPT disminuirá y la ETR podría tener un ligero aumento del 2030 al 2050. Esto podría deberse a los patrones de distribución de las variables de la precipitación y temperatura y años de proyección que fueron considerados en el Modelo FIO-ESM-2-0 para la Región del Pacífico Occidental de Panamá, condicionando así el rendimiento hídrico de la subcuenca del río David al ubicarse en esta zona del país.

Para representar la distribución del rendimiento hídrico (RH), precipitación (PPT) y la evapotranspiración real (ETR) promedio anual del escenario actual y los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050 se graficó cada una de estas variables. (ver Figuras 6 y 7).

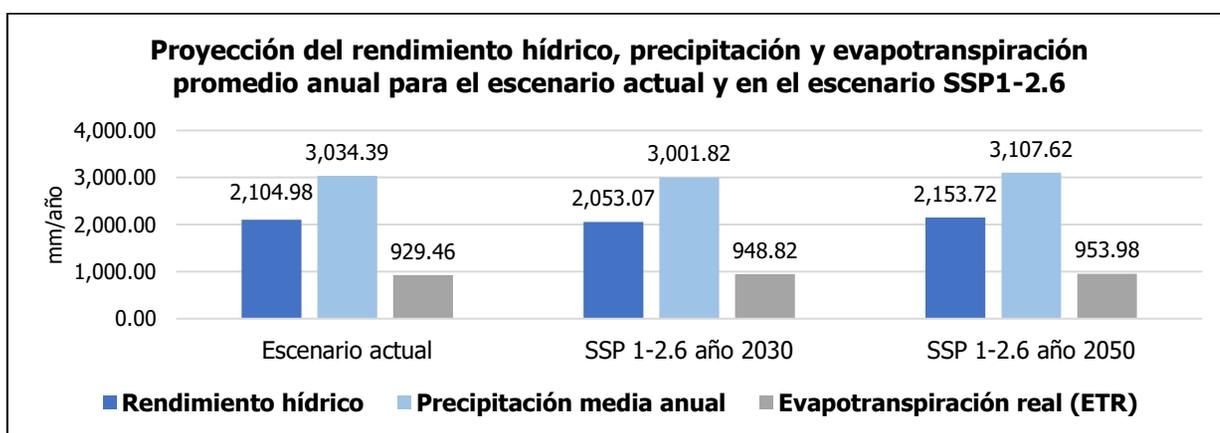


Figura 6. Proyección del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual para el escenario actual y los escenarios SSP1-2.6

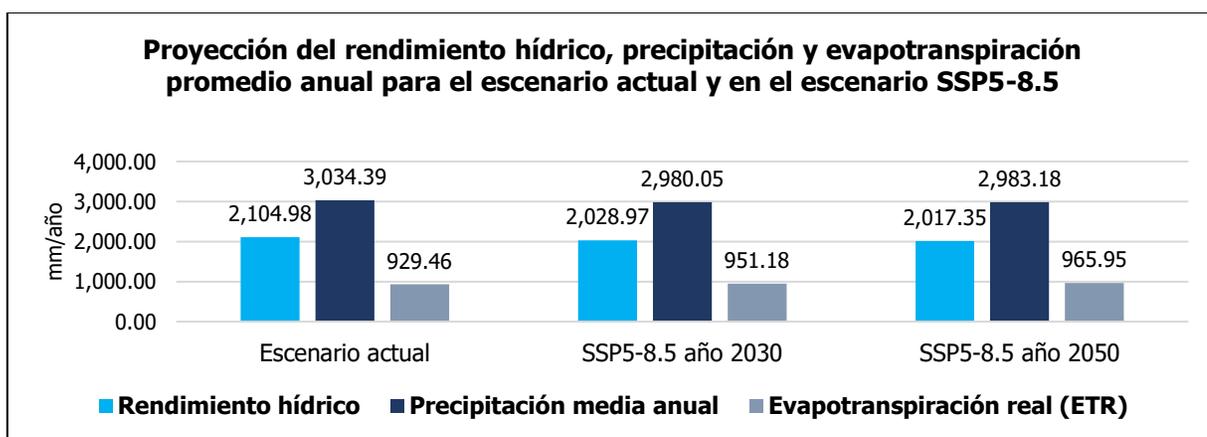


Figura 7. Proyección del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual para el escenario actual y los escenarios SSP5-8.5

En el proceso de la estimación del rendimiento hídrico, el patrón espacial de la producción de agua está directamente relacionado con las características de distribución de los elementos climáticos regionales y del uso de la tierra y cobertura terrestre o LULC (Wei et al. 2021). Por lo tanto, los cambios en el LULC también pueden alterar los ciclos hidrológicos, afectando los

patrones de evapotranspiración, infiltración y retención de agua (Song et al. 2015 citado por Yu et al. 2022). Y, por consiguiente, la dinámica de cambio del uso del suelo y la intensidad de transformación en la cobertura vegetal determinan la magnitud del incremento o disminución del rendimiento hídrico (Lovera et al. 2018).

Estudios anteriores han demostrado que la disminución en la precipitación da como resultado una reducción correspondiente en el rendimiento del agua, considerándose como el factor más importante que afecta a este proceso. Además, la evapotranspiración es un componente clave del ciclo del agua terrestre que conecta la atmósfera, la vegetación y el suelo (Yin et al. 2021).

El modelo AWY de InVEST requiere del parámetro de los atributos biofísicos de los datos LULC, el coeficiente de evapotranspiración del cultivo (K_c) y la profundidad de la raíz, por lo que las diferentes bases de datos de uso del suelo y cobertura terrestre, implican cambios en la evapotranspiración y que a su vez impactan en la producción de agua simulada, debido a que el K_c es un coeficiente que permite ajustar los valores de la evapotranspiración de referencia y adecuarlos en cada caso al tipo de cobertura vegetal (Pessacg et al. 2017).

De acuerdo a Minga (2018), los distintos rendimientos hídricos se atribuyen principalmente a la influencia del coeficiente de evapotranspiración (K_c) en la estimación de la ETR. El valor de K_c depende del tipo de cobertura vegetal, cuando menor es el K_c , menor es la ETR y por consiguiente mayor producción hídrica; y viceversa. Por otra parte, las distintas clases de uso de la tierra y cobertura terrestre implican no sólo cambios en la evapotranspiración sino también en la profundidad de las raíces, que a su vez impacta en la capacidad del suelo de almacenar agua (Pessacg, et al. 2017).

A continuación, la Figura 8 presenta la gráfica de la variación porcentual del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual entre los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050, en donde se observa los valores porcentuales obtenidos para cada uno de los escenarios SSP analizados.

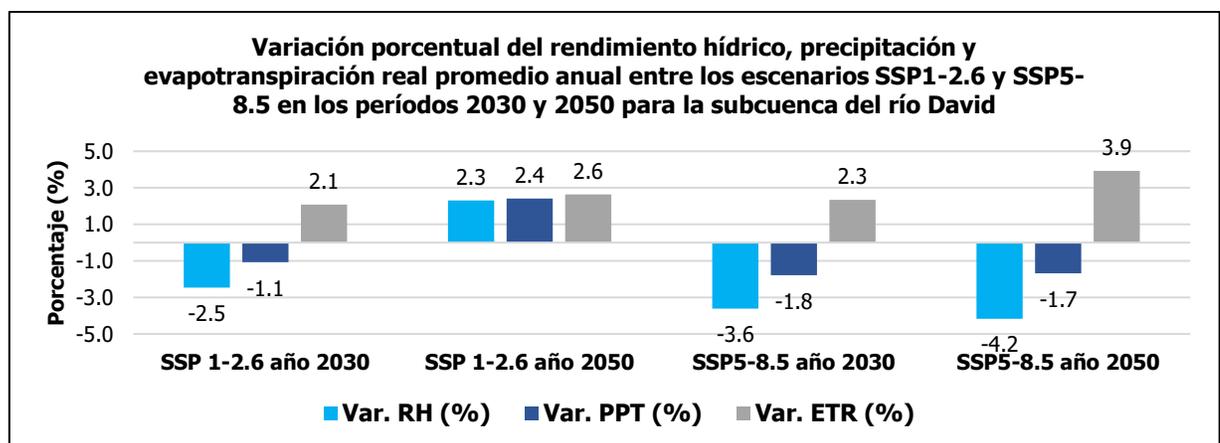


Figura 8. Variación porcentual del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración real promedio anual entre los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050 para la subcuenca del río David

La subcuenca del río David para el escenario SSP1-2.6 podría presentar una disminución del rendimiento hídrico (RH) del 2.5% al período del 2030 y un aumento del 2.3% al período del 2050 con respecto al escenario actual. En cambio, se estimó una reducción en el rendimiento hídrico del escenario actual al escenario SSP5-8.5, resultando en una disminución del 3.6% y 4.2% para los períodos 2030 y 2050 respectivamente.

La precipitación (PPT) del escenario SSP1-2.6 podría presentar incrementos y decrementos al comparar esta variable con el escenario actual, estimándose una disminución de 1.1% al 2030 y un aumento del 2.4% al período 2050. Por otra parte, existe una reducción de la precipitación para el escenario SSP5-8.5, al calcularse una disminución del 1.8% al período 2030 y 1.7% al período 2050.

A nivel geoespacial, se observa un incremento de la evapotranspiración real (ETR) media anual para los escenarios de cambio climático en contraste con el escenario actual, en donde se estima un aumento de la ETR para el escenario SSP1-2.6 del 2.1% y 2.6% para los períodos 2030 y 2050 respectivamente; mientras que el escenario SSP5-8.5 podría presentar aumentos en la ETR del 2.3% y 3.9% para los períodos 2030 y 2050 respectivamente.

Al calcular la diferencia neta del RH, PPT y ETR promedio anual en el área de estudio, se obtuvo que en el escenario SSP1-2.6 al año 2030, las variables de RH y PPT poseen valores negativos, es decir, se podrá presentar una reducción de 51.91 mm/año y 32.57 mm/año respectivamente y un aumento de la ETR de 19.36 mm/año. En sentido opuesto, el escenario SSP1-2.6 al año 2050 presentó valores positivos en las variables analizadas, por lo tanto, se podría tener un aumento del RH de 48.74 mm/año, una PPT de 73.23 mm/año y una ETR de 24.52 mm/año. Mientras que en el escenario SSP5-8.5 al año 2030, se observan valores negativos en el RH de 76.01 mm/año y la PPT de 54.34 mm/año y un aumento en la ETR de 21.72 mm/año. De igual forma, en el escenario SSP5-8.5 al 2050, se obtuvo valores negativos del RH y PPT, al calcularse una reducción de 87.63 mm/año y 51.21 mm/año respectivamente y un aumento de la ETR de 36.49 mm/año (ver Figura 9).

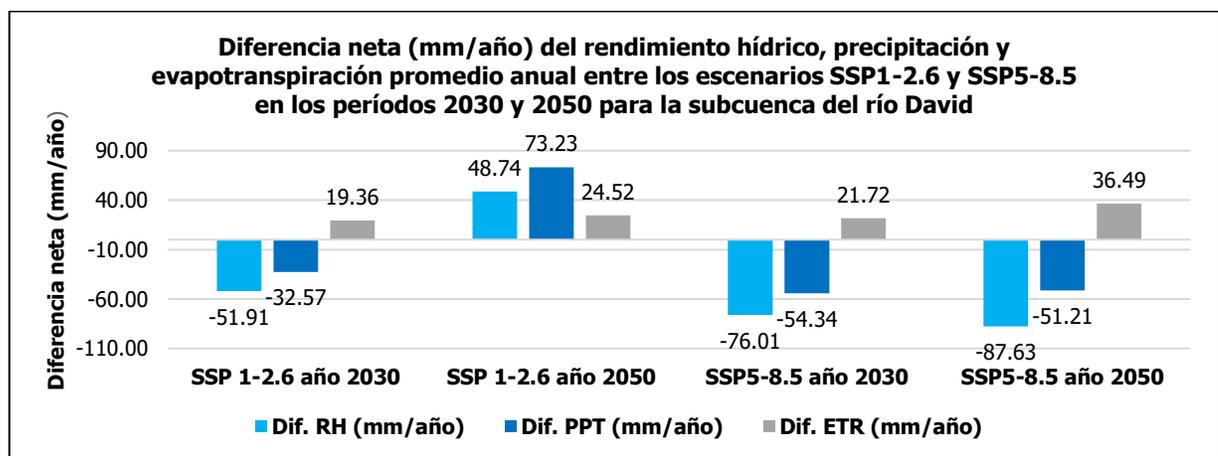


Figura 9. Diferencia neta (mm/año) del rendimiento hídrico, precipitación y evapotranspiración promedio anual entre los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050 para la subcuenca del río David

4.1.1 Distribución del rendimiento hídrico actual y futuro utilizando los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del Modelo FIO-ESM-2-0

Las figuras 8 y 9 presentan la distribución del rendimiento hídrico (RH) anual en la subcuenca del río David para el escenario actual y en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050 con base al Modelo FIO-ESM-2-0. A nivel geoespacial, se observa que el escenario actual posee valores de alto RH distribuidos entre las partes altas y medias de la subcuenca, a comparación de las partes bajas, donde se obtuvo valores menores de RH. No obstante, en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 los valores del RH podrían reducirse, esto posiblemente esté relacionado con una disminución de la precipitación a futuro.

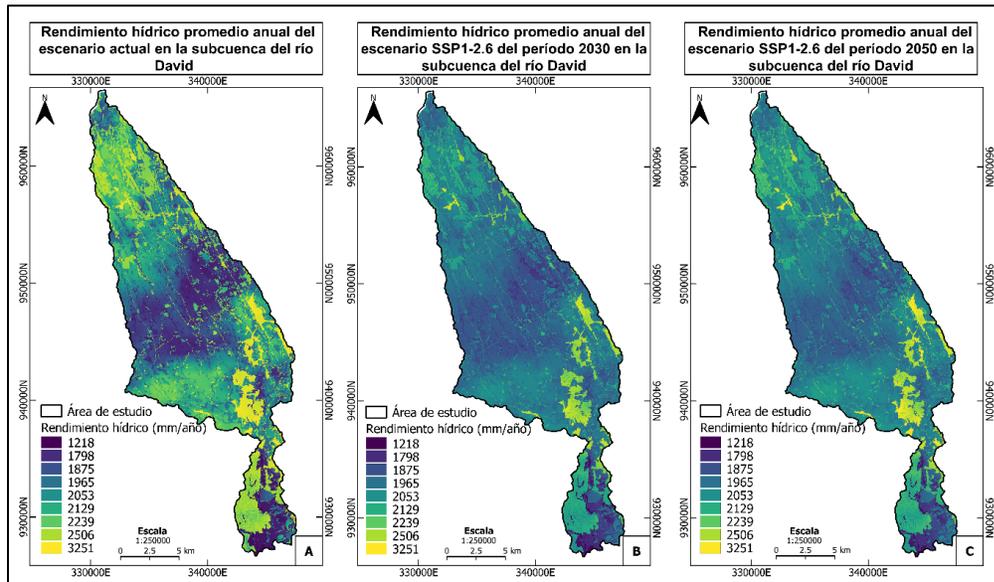


Figura 10. Distribución del rendimiento hídrico en la subcuenca del río David para el escenario actual y del escenario SSP1-2.6 en los períodos 2030 y 2050

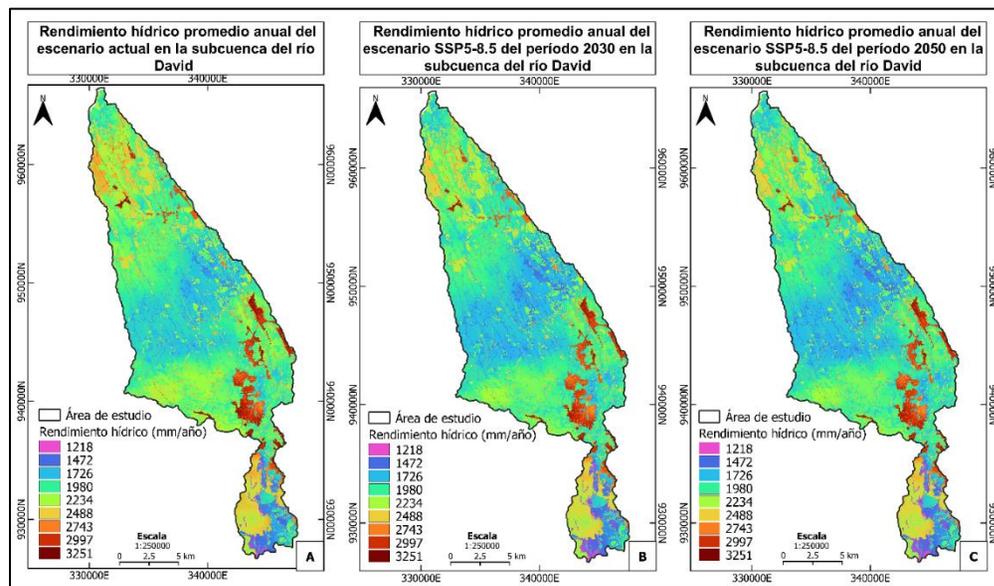


Figura 11. Distribución del rendimiento hídrico en la subcuenca del río David para el escenario actual y del escenario SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050

El cálculo de la producción de agua sigue siendo un proceso complejo, ya que se ve afectada no solo por la intensidad de la precipitación, la permeabilidad del suelo, la pendiente y la vegetación, sino también por el clima y el uso de la tierra y cobertura terrestre, y aún más cuando se considera al cambio climático, el cual puede afectar directamente la producción del agua al influir en la precipitación y la evaporación en la cuenca, debido a que se aumenta la incertidumbre y la complejidad del ciclo hidrológico (Yu et al. 2022).

Como se indicó anteriormente, la variación en la distribución del rendimiento hídrico en la subcuenca del río David podría estar asociado a los datos de las variables de la precipitación proyectadas en el Modelo FIO-ESM-2-0 y en el cálculo de la ETR, la cual requiere de un Kc determinado por la clase de uso del suelo y cobertura terrestre del área de estudio.

4.1.2 Producción del rendimiento hídrico (PRH) en el escenario actual y futuro de cambio climático

Se determinó la distribución superficial por hectárea (ha) de cada una de las categorías de producción de rendimiento hídrico (PRH) para el escenario actual y futuro de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del período 2030 y 2050 con la finalidad de visualizar en el área de estudio el comportamiento del aumento o disminución de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH).

Producción de rendimiento hídrico en el escenario actual

Según la clasificación de las categorías de PRH del escenario actual en el área de estudio, las categorías de alta PRH y media PRH poseen una mayor distribución superficial con una extensión de 16,001.1 ha (54.9%) y 11,913.0 ha (40.8%) respectivamente. Por el contrario, las zonas con menor distribución superficial se encuentran en las categorías de muy alta PRH, abarcando 819.9 hectáreas (2.8%) y baja PRH con un área de 433.4 ha (1.5%) (Figura 12).

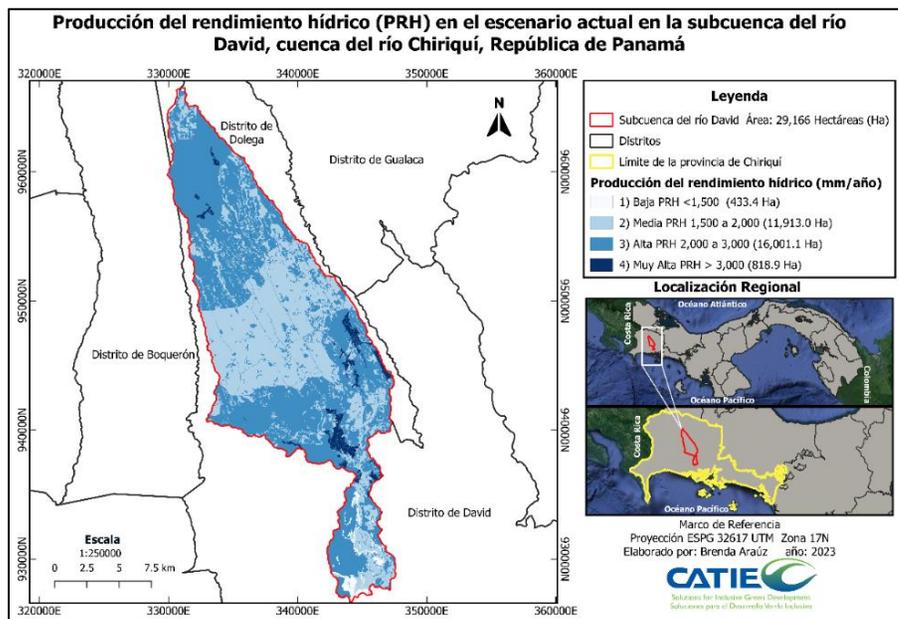


Figura 12. Producción del rendimiento hídrico en el escenario actual en la subcuenca del río David

Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP1-2.6 del período 2030

Para el escenario SSP1-2.6 del período 2030, la categoría de media PRH presentará una mayor distribución en el territorio del área de estudio, al ocupar 14,088.7 ha (48.3%), seguidamente de la categoría de alta PRH con un área de 13,819.3 ha (47.4%). Sin embargo, las categorías con menor distribución de superficie para este escenario de cambio climático se ubican en las categorías de muy alta PRH y baja PRH, las cuales podrían tener un área de 661.4 ha (2.3%) y 596.9 ha (2.0%) respectivamente (Figura 13).

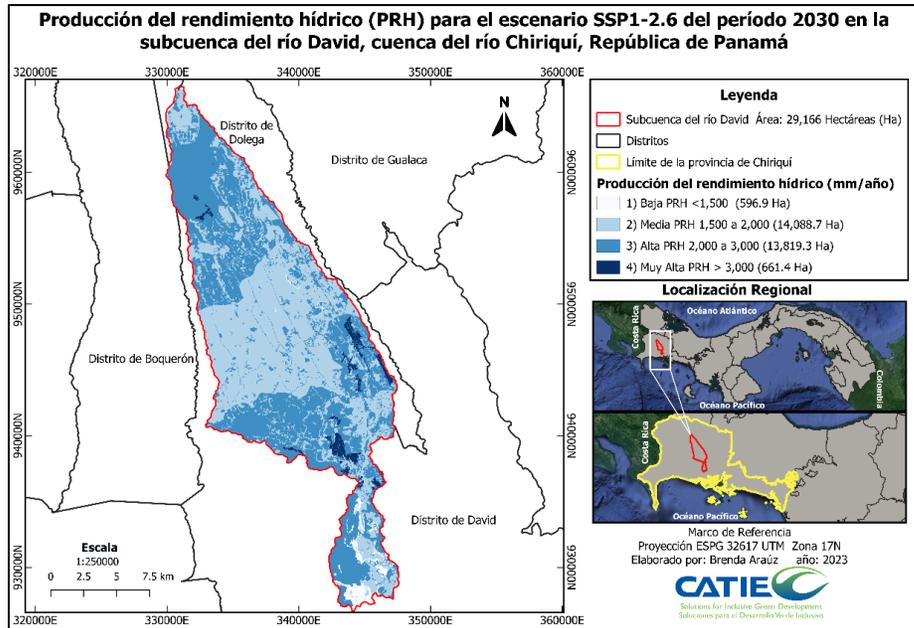


Figura 13. Producción del rendimiento hídrico (PRH) para el escenario SSP1-2.6 del período 2030

Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP1-2.6 del período 2050

En la clasificación de las categorías de las APRH para el escenario SSP1-2.6 del período 2050 se estimó que la categoría de alta PRH tendrá una mayor distribución superficial, ocupando 17,546.95 ha (60.2%). La zona con una producción intermedia de agua categorizada como media PRH presentará un área de 10,141.31 ha (34.8%). Por otra parte, en la categoría de muy alta PRH se calculó un área de 1,154.24 ha (4.0%). Mientras que la zona de menor distribución superficial, se ubica en la categoría de baja PRH, la cual posee un área estimada de 324.16 ha (1.1%) (Figura 14).

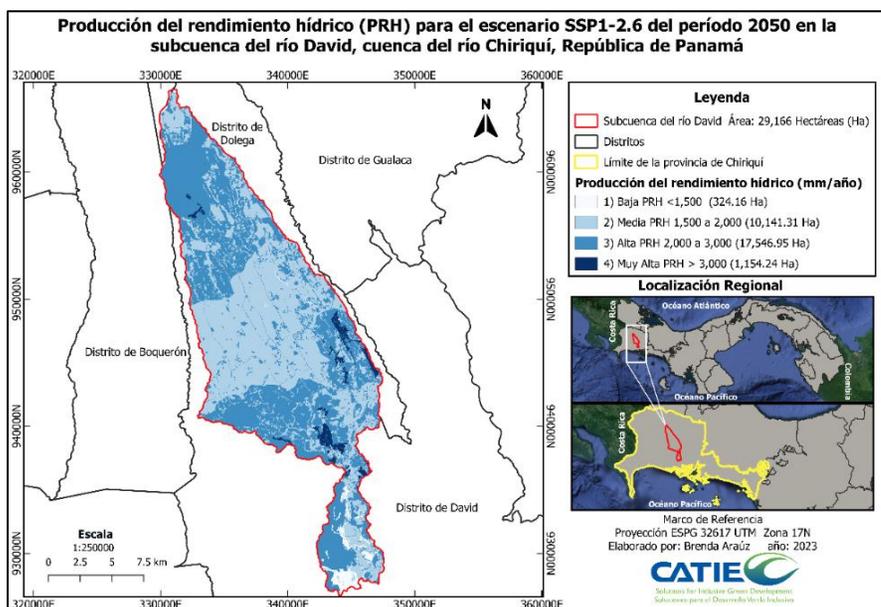


Figura 14. Producción del rendimiento hídrico (PRH) para el escenario SSP1-2.6 del período 2050 en la subcuenca del río David

Producción del rendimiento hídrico para el escenario para el escenario SSP5-8.5 del período 2030

La PRH para el escenario SSP5-8.5 del período 2030 será mayor en las categorías de media PRH al presentar una distribución de 15,174.76 ha (52.0%) y alta PRH con un área de 12,752.58 ha (43.7%). En contraste, las zonas con menor distribución en la superficie del territorio de la subcuenca se localizarán en la categoría de baja PRH con un área estimada de 686.94 ha (2.4%) y en la categoría de muy alta PRH con un área de 552.09 ha (1.9%) (Figura 15).

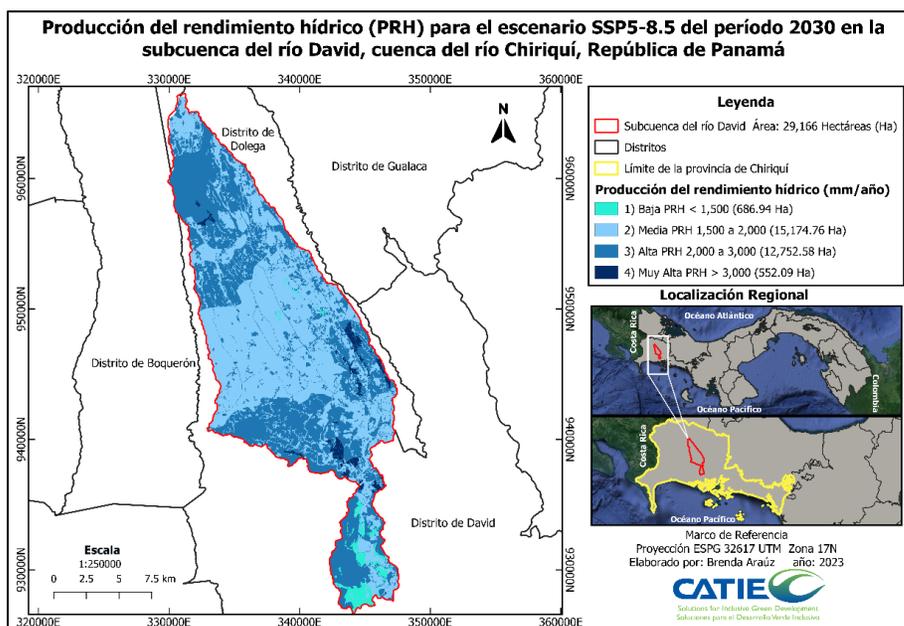


Figura 15. Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP5-8.5 del período 2030 en la subcuenca del río David

Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP5-8.5 del período 2050

Para el escenario SSP5-8.5 del período 2050, se calculó que la categoría de media PRH estará distribuida en 15,848.46 hectáreas correspondiente al 54.3% del territorio total de área de estudio, seguidamente de la categoría de alta PRH, la cual se estima que tendrá un área de 11,957.58 hectáreas (41%). Mientras que las zonas con menor distribución con respecto a la superficie del área de estudio, estarán ubicadas en las categorías de baja PRH, en donde se estimó un área de 742.83 hectáreas (2.5%) y en la categoría de muy alta PRH con un área de 617.45 hectáreas (2.1%) (Figura 16).

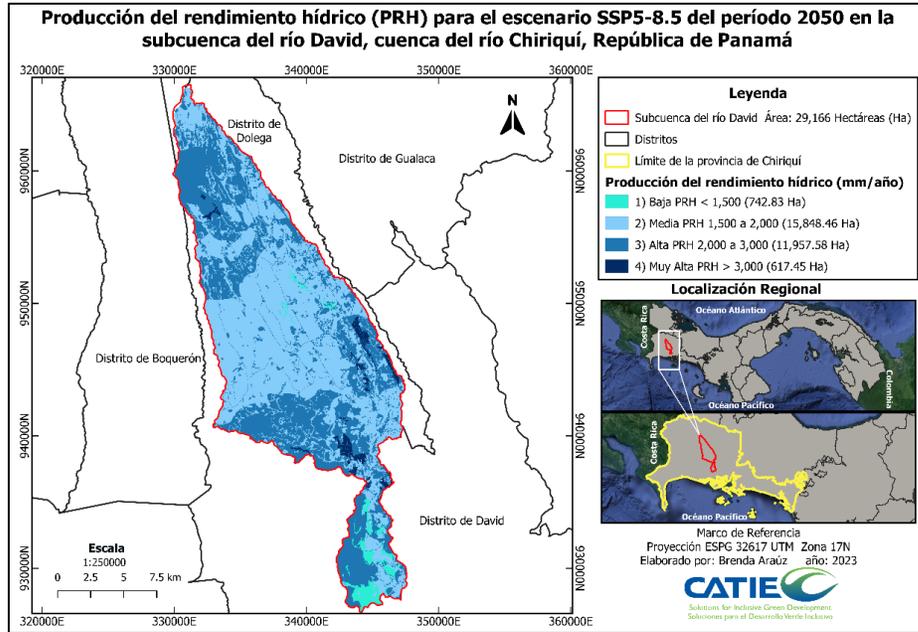


Figura 16. Producción del rendimiento hídrico para el escenario SSP5-8.5 del período 2050 en la subcuenca del río David

Al analizar la distribución superficial de las categorías de producción de rendimiento hídrico (PRH) en el territorio total de la subcuenca del río David, se encontró que las categorías de media y alta PRH poseen una mayor distribución a diferencia de las categorías de baja y muy alta PRH y la distribución superficial de estas categorías varía en cada escenario analizado.

De acuerdo al cálculo del área de cada categoría de PRH, se obtuvo que en el escenario actual, las categorías de alta y media PRH tendrán una mayor distribución. En el escenario SSP1-2.6 al año 2030, serán las zonas de media y alta PRH, pero al año 2050 se presentarán en las categorías de alta y media PRH. En el escenario SSP5-8.5, las categorías de media y alta PRH tendrán una mayor distribución para los años 2030 y 2050.

Por otro lado, la categoría que obtuvo una menor distribución en el territorio para el escenario actual y en el escenario SPP1-2.6 en los años 2030 y 2050 fue la categoría de baja PRH, seguido de la categoría de muy alta PRH. En cambio, en el escenario SSP5-8.5, las categorías de muy alta y baja PRH tendrían menor distribución en la superficie para los períodos 2030 y 2050.

Posiblemente la predominancia de las áreas de media y alta PRH, en la subcuenca del río David, se debe al comportamiento de la precipitación en el territorio, en donde los escenarios de cambio climático podrían presentar un aumento en la ocurrencia de las lluvias sobre estas zonas e influir en la disminución de la superficie para las categorías de baja y muy alta PRH. Sin embargo, la topografía y las condiciones actuales del uso de la tierra y cobertura terrestre, también son otras de las variables que influyen directamente en el rendimiento hídrico.

4.2 Pérdida y ganancia de áreas potenciales de áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH)

A continuación, se presenta el análisis de la pérdida y ganancia de APRH en la subcuenca del río David realizado a partir de la producción hídrica a nivel píxel en el área de estudio, en el cual se determinaron las zonas con baja, media, alta y muy alta producción de rendimiento hídrico (PRH) comparando los cambios en las categorías de PRH del escenario actual con los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050.

Pérdida y ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2030

En el análisis de los cambios de las APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del período 2030, se obtuvo que el 9.0% corresponde a los cambios y el 91.0% representa a las zonas de no cambios, es decir, áreas que mantendrán la misma categoría de PRH. Se determinó que las pérdidas de las APRH se presentarán en las categorías de media PRH, alta PRH y muy alta PRH. Sin embargo, no habrá una pérdida de la categoría de baja PRH (valor de 0 ha, ver Figura 17) bajo estos escenarios (ver Figura 18). Con respecto a la ganancia de APRH, se estima que existirá una mayor ganancia de superficie en las categorías de baja PRH, media PRH y muy alta PRH. Por otro lado, no ocurrirá un cambio en la categoría de muy alta PRH (valor de 0 ha, ver Figura 19), por consiguiente, no existirá un aumento de superficie de esta categoría al SSP1-2.6 del 2030 (ver Figura 20).

En la Figura 17, se presenta la gráfica de la pérdida APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2030, en donde se obtuvo que la categoría de alta PRH tendrá una mayor pérdida en cuanto a la distribución de dicha categoría dentro del área de estudio, al estimarse una disminución de 7,003.78 ha (88%). Por otro lado, la categoría de muy alta PRH tendrá una disminución de 626.63 ha (8%) y en la categoría de media PRH, se estima que ocurrirá una reducción de 325.50 ha (4%). No obstante, la categoría de baja PRH no presentará la condición de pérdida, al resultar un valor de 0 ha, debido a que no presentarán cambios de PRH en este escenario futuro.

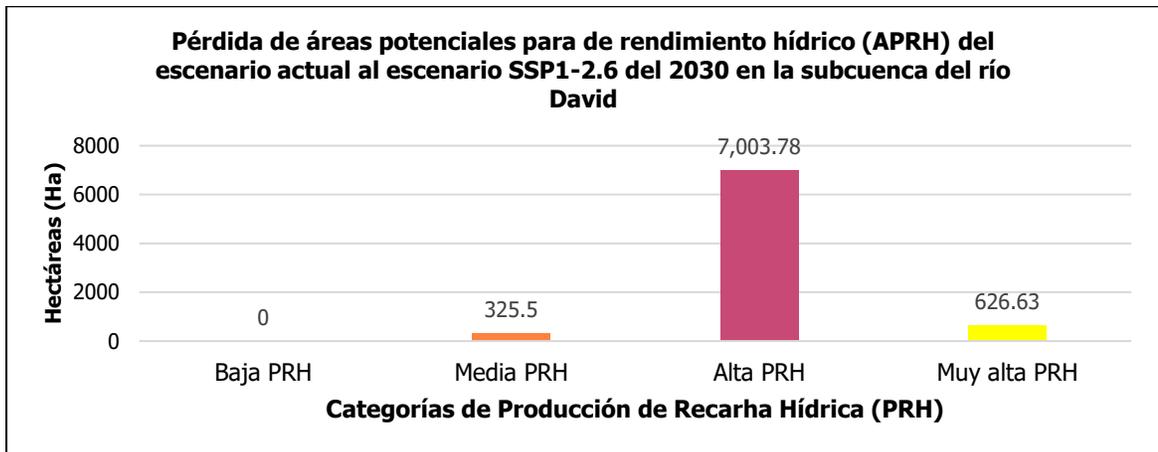


Figura 17. Pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2030 en la subcuenca del río David

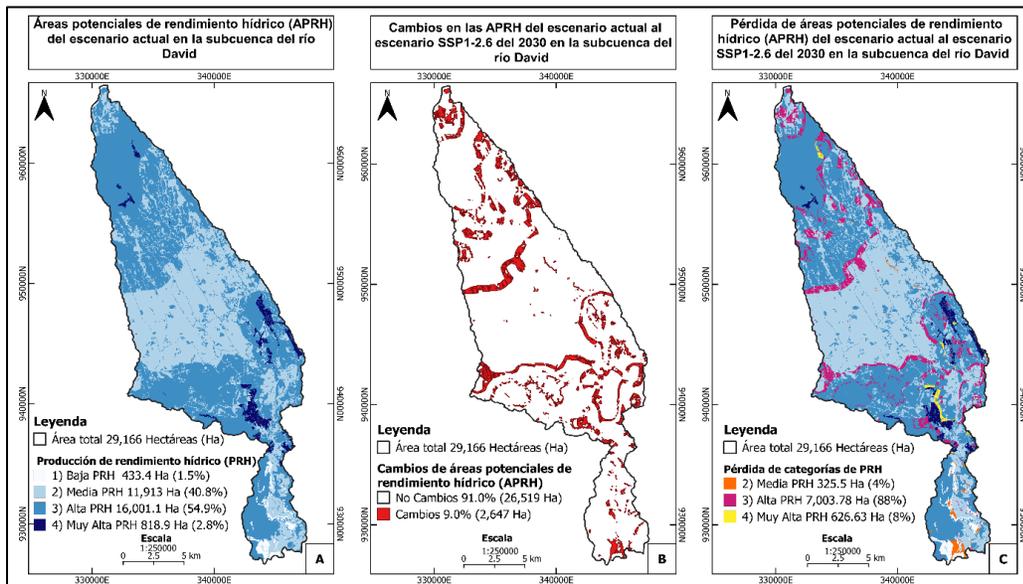


Figura 18. Mapa de la pérdida de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2030

La Figura 19 muestra la gráfica de la ganancia APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del período 2030, obteniéndose que la categoría de media PRH tendría una mayor ganancia con respecto a la distribución en el área de estudio, al estimarse un aumento de 4,669.2 ha (88%). Mientras que la categoría de alta PRH podría presentar un aumento de 469.96 ha (9%) y se estima que la categoría de baja PRH aumentaría 162.8 ha (3%). Por otro lado, la categoría de muy alta PRH no tendrá una ganancia de superficie, al resultar un valor de 0 ha, debido a que no ocurrirán cambios en las zonas donde la PRH sea muy alta para el escenario SSP1-2.6 del período 2030.

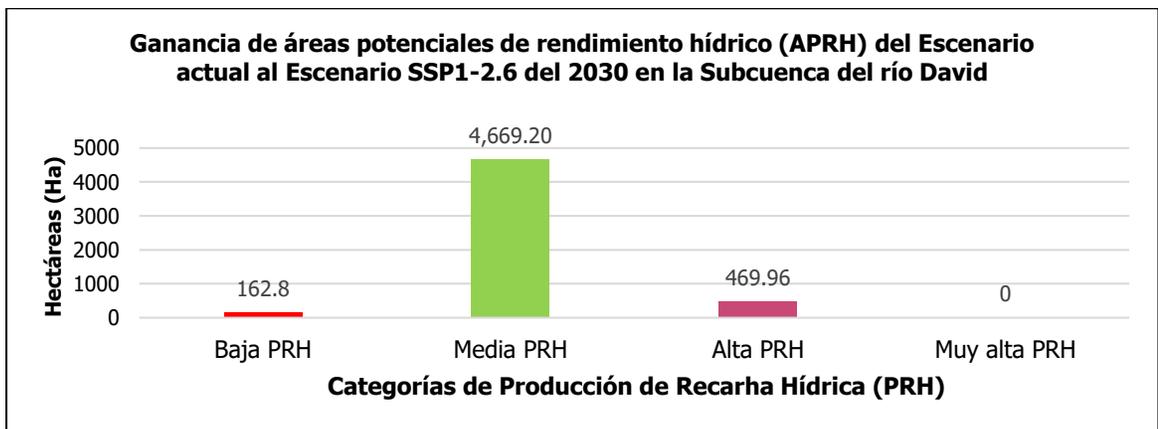


Figura 19. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2030 en la subcuenca del río David

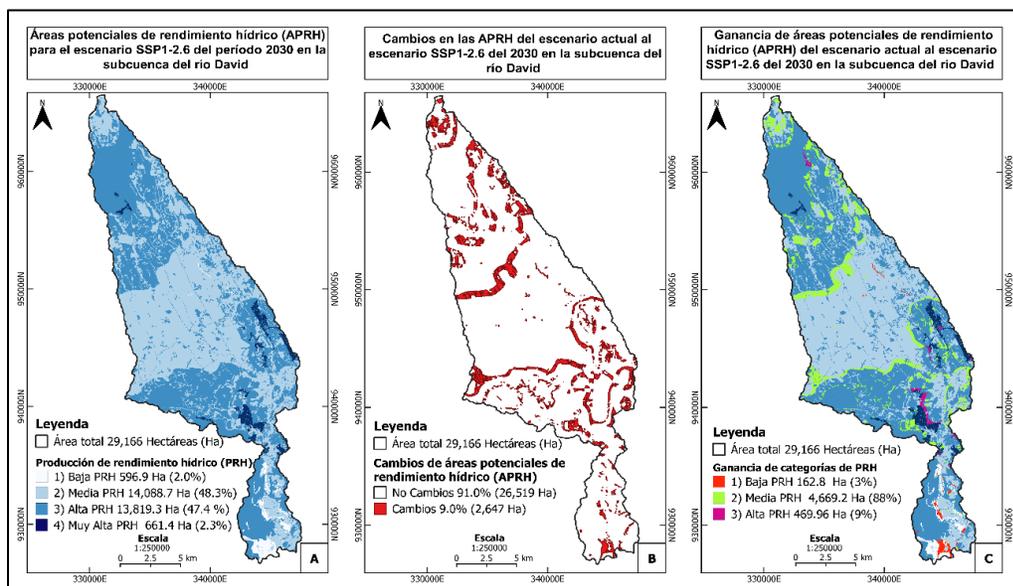


Figura 20. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2030

Pérdida y ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2050

Los resultados obtenidos del análisis de los cambios de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del período 2050, indican el 7.9% corresponde a las zonas que tendrán cambios y el 92.1% no presentarán cambios. Se estima que las pérdidas de APRH ocurrirán en las categorías de baja PRH, media PRH y alta PRH. No obstante, no habrá pérdidas en las APRH donde la categoría sea de muy alta PRH (valor de 0 ha, ver Figura 21) al comparar ambos escenarios (Figura 22). Mientras que las categorías de media PRH, alta PRH y muy alta PRH podrían tener ganancia de áreas al escenario SSP1-2.6 del 2050, la categoría de baja PRH no tendrá un aumento de superficie (valor de 0 ha, ver Figura 23), es decir, se mantendrán las zonas con esta categoría al escenario futuro (Figura 24).

La Figura 21 presenta la gráfica de la pérdida APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2050, estimándose que la categoría de media PRH tendrá una mayor pérdida de superficie, al calcularse una disminución de 3,755.8 ha (77.2%). Para la categoría de alta PRH, se calculó una disminución de 1,002 ha (20.6%) y la categoría de baja PRH podría tener una reducción de 109.3 ha (2.2%). Por otro lado, la categoría de muy alta PRH no presentará la condición de pérdida, al resultar un valor de 0 ha.

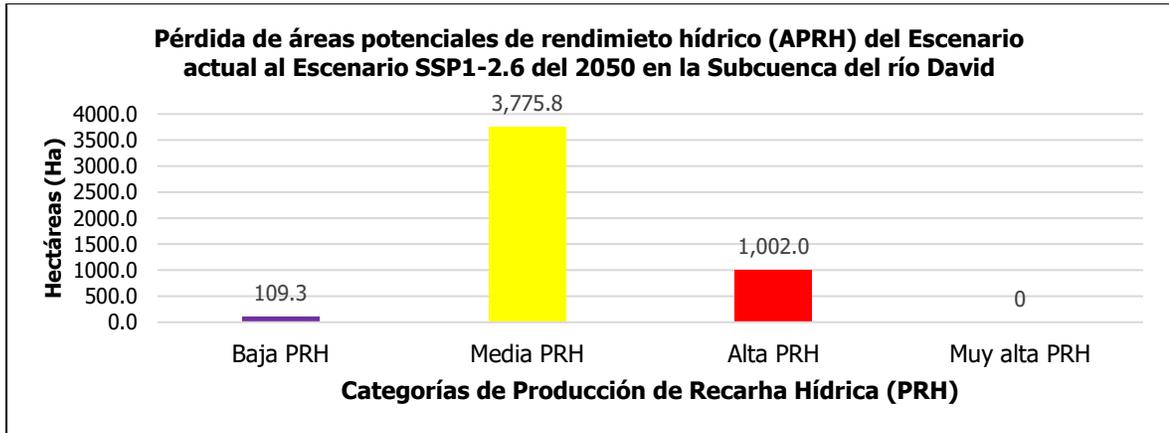


Figura 21. Pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2050 en la subcuenca del río David

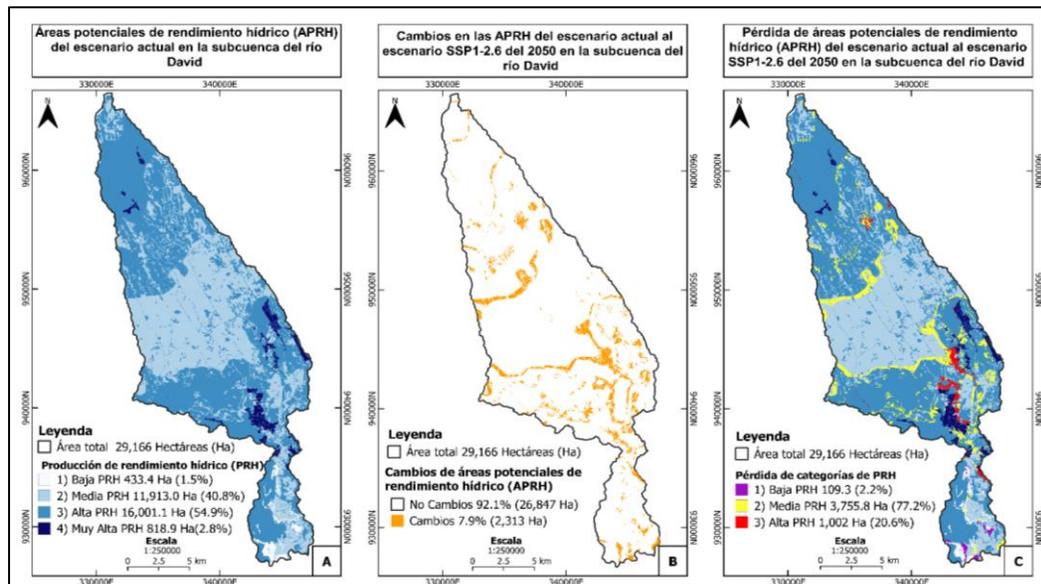


Figura 22. Mapa de la pérdida de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2050

En la Figura 23, se muestra la gráfica de la ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del período, resultando la categoría de alta PRH con una mayor ganancia de superficie, al estimarse un aumento de 5,633.8 ha (78.4%). En la categoría de muy alta PRH se calculó un aumento de 1,336 ha (18.6%) y para la categoría de baja PRH se estima una ganancia de 218.5 ha (3%). No obstante, la categoría de baja PRH no tendrá una ganancia de superficie, al resultar un valor de 0 ha.

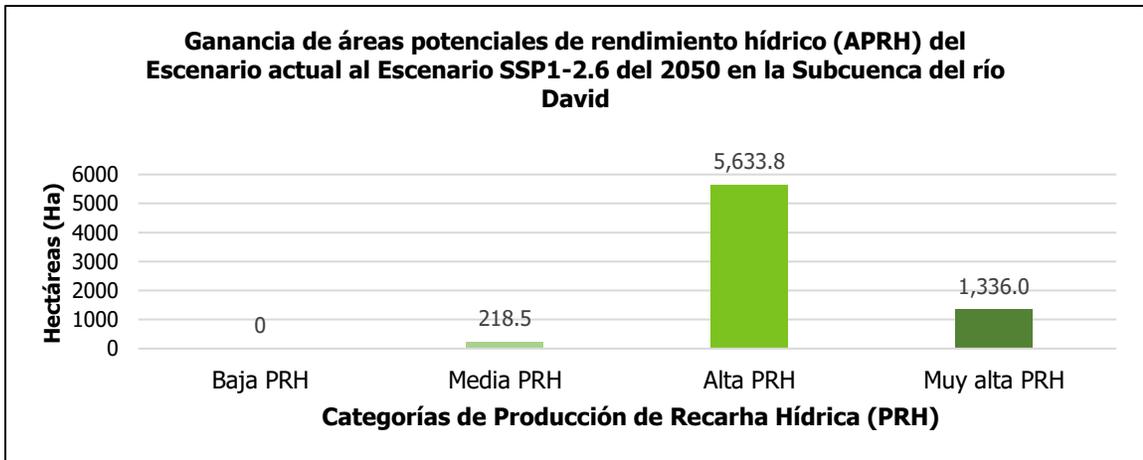


Figura 23. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 del 2050 en la subcuenca del río David

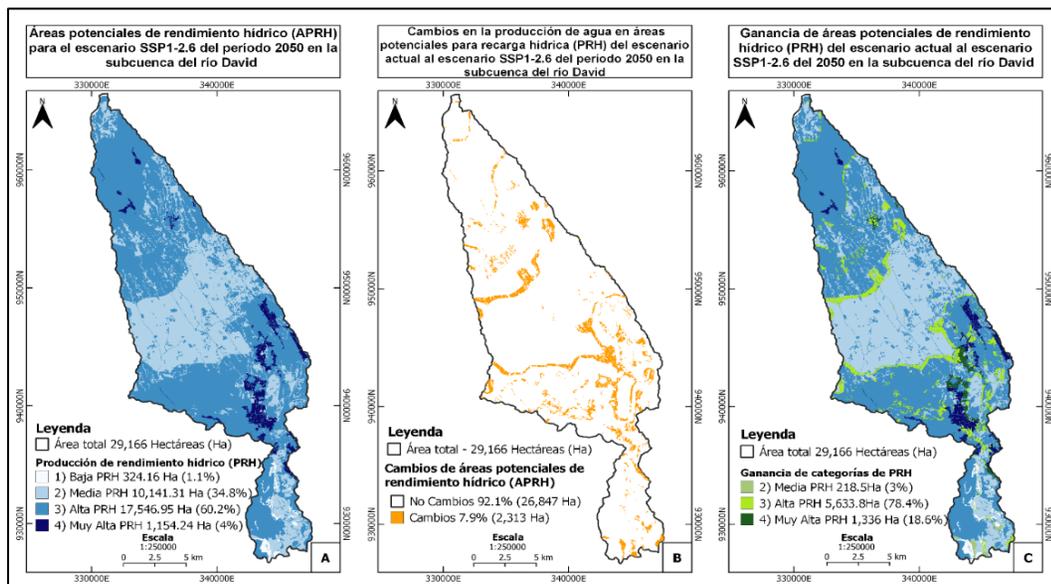


Figura 24. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP1-2.6 para el período 2050

Pérdida y ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030

En el análisis de los cambios de las APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del 2030, se determinó que el 14.0% representará a los cambios y el 86% corresponde a las zonas de no cambios en las categorías de PRH. Se estimó que las pérdidas de superficie de las APRH ocurrirán para las categorías de media PRH, alta PRH y muy alta PRH. Mientras que la categoría de baja PRH no presentará la condición de pérdida (valor de 0 ha, ver Figura 25) en relación a estos escenarios (Figura 26). La ganancia de APRH ocurrirá en las categorías de baja PRH, media PRH y alta PRH. Pero, la categoría de muy alta PRH no presentará un aumento de superficie (valor de 0 ha, ver Figura 27), según el escenario SSP5-8.5 al 2030 (Figura 28).

La Figura 25, presenta la gráfica de la pérdida APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del período 2030, siendo la categoría de alta PRH, la cual tendrá una mayor reducción de superficie, al calcularse una disminución de 10,523.16 ha (87%). Por otro lado, las zonas que tendrán una menor pérdida de superficie, serán las categorías de media PRH y muy alta PRH, teniendo una disminución de 505.90 ha (4.2%) y 1,062.06 ha (8.8%) respectivamente. En la categoría de baja PRH no ocurrirá la condición de pérdida de superficie en la distribución de esta categoría, obteniéndose un valor de 0 ha.

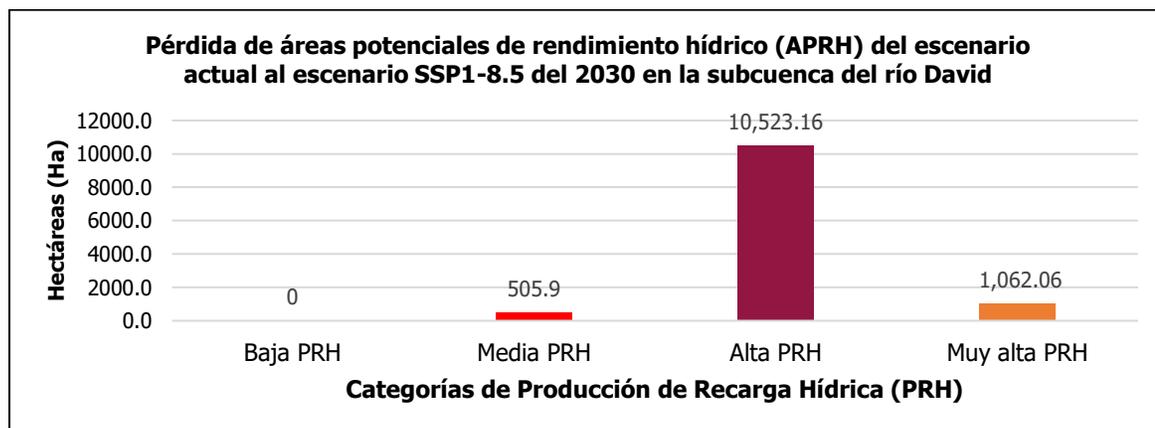


Figura 25. Pérdida APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030 en la subcuenca del río David

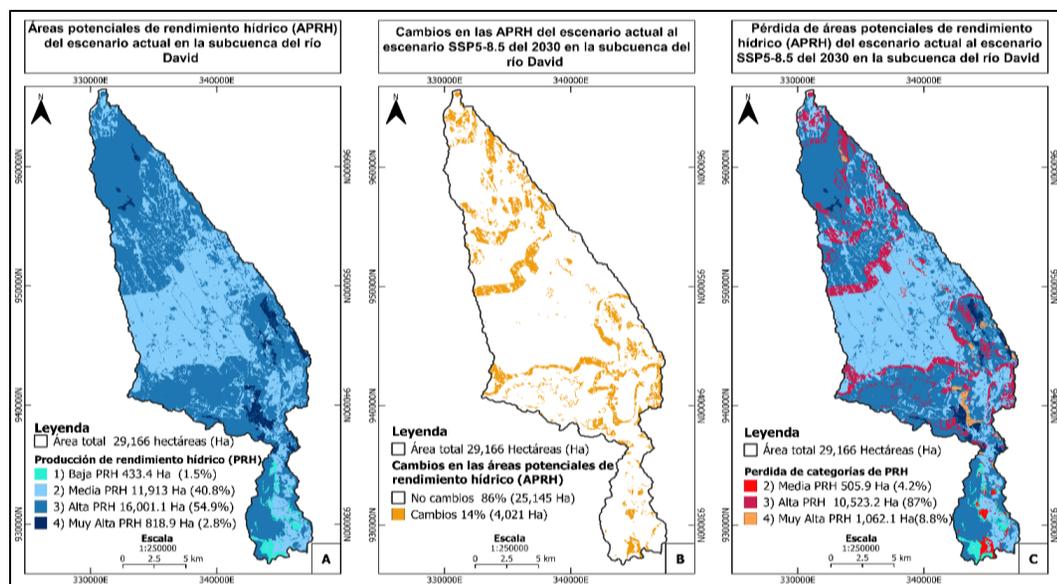


Figura 26. Mapa de la pérdida APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030

La Figura 27, presenta la gráfica de la ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del período 2030, resultando la categoría de media PRH con una mayor ganancia de superficie, al estimarse un aumento de 7,015.44 ha (87%). Mientras que la categoría de alta PRH tendrá un aumento de 796.6 ha (9.9%) y para la categoría de baja PRH se estimó un aumento de 252.95 ha (3.1%). La categoría de muy alta PRH no tendrá una ganancia de

superficie, debido a que resultó en un valor de 0 ha, es decir, no se presentarán cambios en esta categoría de PRH.

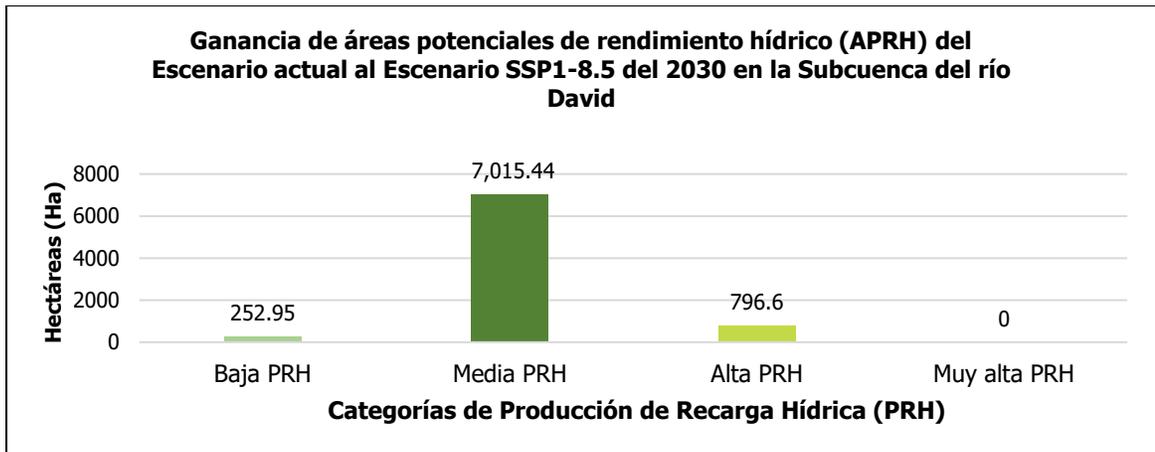


Figura 27. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del 2030 en la subcuenca del río David

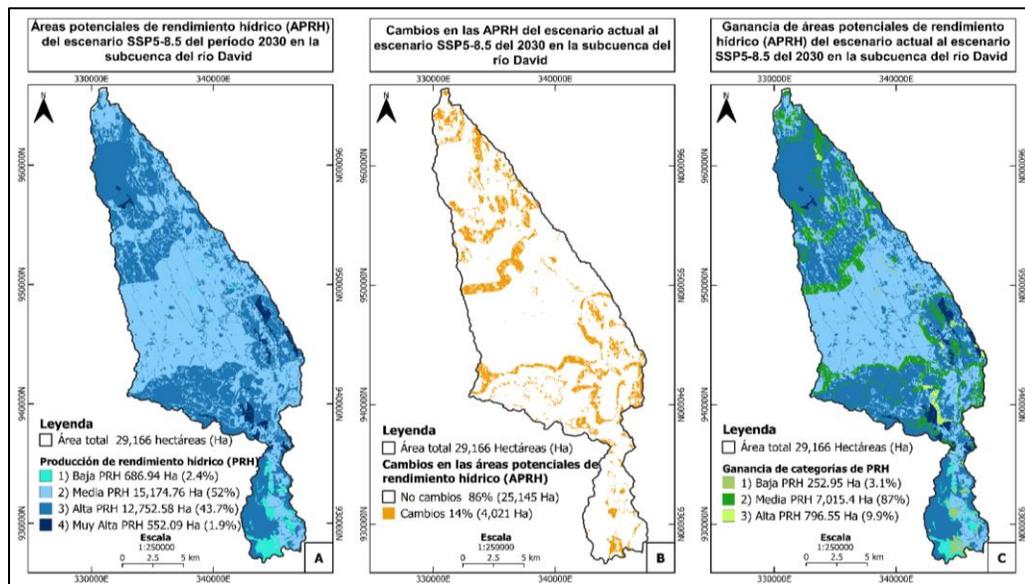


Figura 28. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2030

Pérdida y ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050

Los resultados obtenidos del análisis de los cambios de las APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del período 2050, indican que el 16.25% representa a los cambios y el 83.25% a las zonas de no cambios de categoría de PRH. Se identificó que las pérdidas de APRH ocurrirán en las categorías de media PRH, alta PRH y muy alta PRH. Por otro lado, la categoría de baja PRH no tendrá la condición de pérdida (valor de 0 ha, ver Figura 29) bajo el contexto de estos escenarios (Figura 30). En el análisis de la ganancia de APRH, se determinó que las categorías de baja PRH, media PRH y alta PRH presentarán un aumento en la distribución de la superficie de cada categoría. No obstante, la categoría de muy alta PRH no presentará una

ganancia de superficie (valor de 0 ha, ver Figura 31), por lo tanto, se mantendrán las zonas con esta categoría al escenario futuro analizado (Figura 32).

La Figura 29, presenta la gráfica de la pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del período 2050, observándose que la categoría de alta PRH posee una mayor pérdida de áreas dentro del territorio de la subcuenca, al calcularse una reducción de 12,709.78 ha (88.95%). Para las categorías de media PRH y muy alta PRH, se estima una disminución de 617.41 ha (4.37%) y 802.38 ha (5.6%) respectivamente. En la categoría de baja PRH se obtuvo un valor de 0 ha debido a que no habrá cambios de categoría en las áreas donde la PRH sea baja al escenario SSP5-8.5 del período 2050.

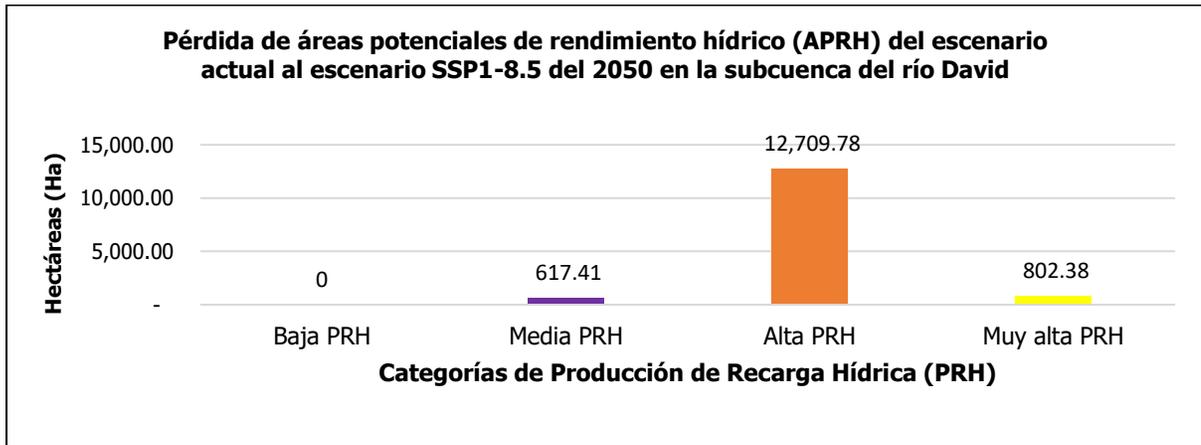


Figura 29. Pérdida de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050 en la subcuenca del río David

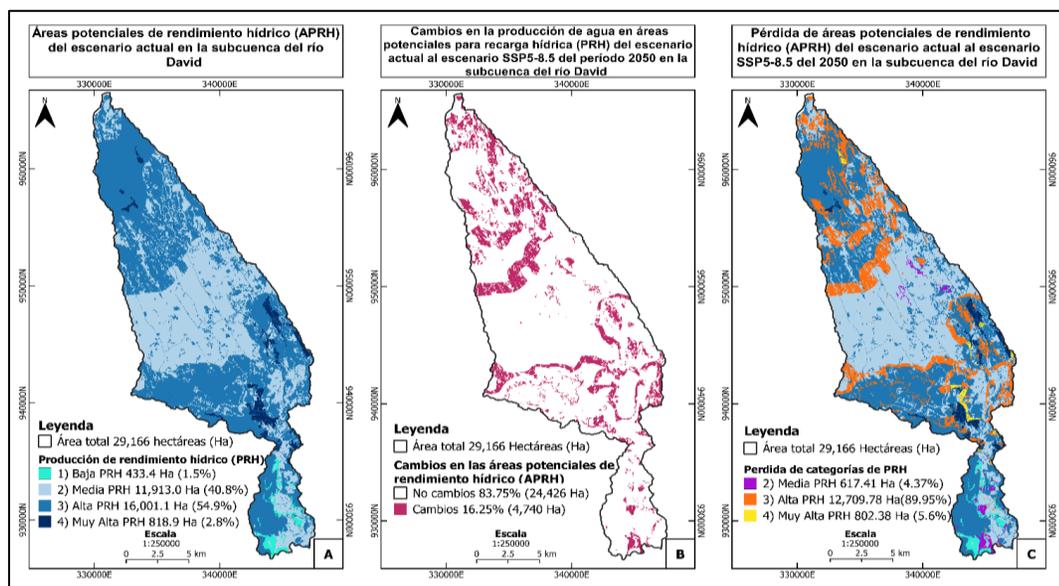


Figura 30. Mapa de la pérdida de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050

La Figura 31, presenta la gráfica de la ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del período 2050, observándose que la categoría de media PRH posee una mayor

ganancia de superficie dentro del territorio de la subcuenca, al estimarse un aumento de 8,473.19 ha (90.3%). Por otro lado, el cálculo de la ganancia de áreas para las categorías baja PRH resultó en un aumento de 308.70 ha (3.29%) y para la categoría de alta PRH se estimó un aumento de 601.78 ha (3.1%). Mientras que en la categoría de muy alta PRH se obtuvo un valor de 0 ha, en este sentido, no ocurrirá una ganancia de superficie al escenario SSP5-8.5 del período 2050.

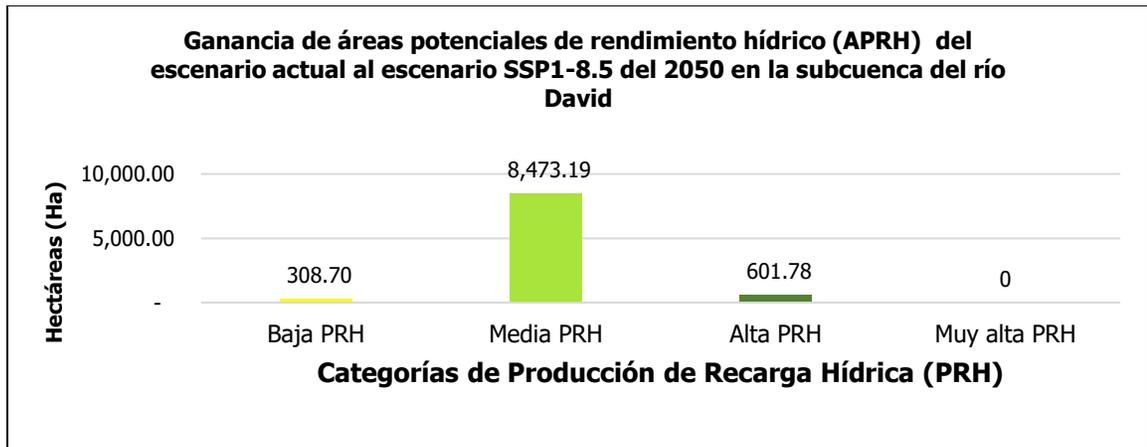


Figura 31. Ganancia de APRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 del 2050 en la subcuenca del río David

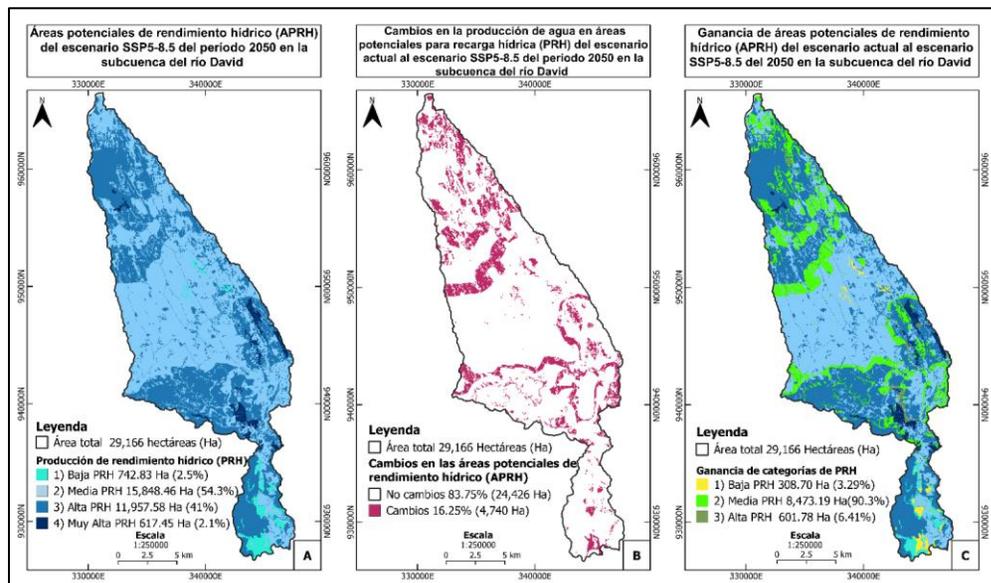


Figura 32. Mapa de la ganancia de APRH en la subcuenca el río David, según los cambios de categoría de PRH del escenario actual al escenario SSP5-8.5 para el período 2050

Comparando la distribución espacial de las pérdidas y ganancias de las categorías de PRH, se puede apreciar que estas varían entre los escenarios de cambio climático analizados. Es relevante mencionar que los cambios en las APRH están condicionados principalmente a las proyecciones de precipitación y temperatura del MCG FIO-ESM-2-0 y los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050.

Al analizar los cambios de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) se determinó que estos no tendrán un alto porcentaje de cambios a nivel territorial de la subcuenca del río David. Al comparar el escenario actual con el escenario SSP1-2.6 en los períodos 2030 y 2050, se obtuvo que los cambios en las APRH ocurrirán entre el 9.0 y 7.9% del área total. Mientras que al contrastar el escenario actual con el escenario SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050, los cambios en las APRH se calcularon entre el 14.0 y 16.25% a lo extenso del territorio.

Por otro lado, las áreas de no cambios indican las zonas en el territorio que mantendrán su misma categoría de PRH del escenario actual a los escenarios de cambio climático. Para el escenario SSP1-2.6, las áreas que no presentarán cambios se distribuyen entre el 91% para el año 2030 y 92.1% al 2050. En el escenario SSP5-8.5 en los períodos 2030 y 2050, las áreas de no cambios se estiman entre el 86 y 83.75% respectivamente.

Por lo tanto, los mapas de cambio de las APRH permiten representar dónde ocurrirán los cambios de APRH y determinar que zonas presentarán la pérdida o ganancia de las categorías de PRH según el escenario de cambio climático y año de proyección e identificar las áreas puntuales de la subcuenca que podrían presentar problemáticas y ser más críticas en cuanto al rendimiento hídrico, donde se deberá evaluar medidas para la protección, manejo y gestión de estas zonas frente al cambio climático.

4.3 Lineamientos de acción para el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río David

4.3.1 Aplicación de la matriz del Análisis FODA

El desarrollo del Análisis FODA permitió la identificación de estrategias para contribuir a potenciar las fortalezas y crear oportunidades para mejorar las condiciones actuales asociadas al manejo, gestión y protección de las APRH en la subcuenca del río David, así como también plantear acciones para corregir y afrontar aquellas situaciones que representan una debilidad o amenaza ante el cambio climático (Cuadro 15).

Cuadro 15. Matriz del Análisis FODA

Análisis	Factores positivos (+)		Factores negativos (-)	
	F	Fortalezas	D	Debilidades
Análisis Interno	F1	Existencia del Comité de la cuenca hidrográfica del río Chiriquí (108).	D1	Poca efectividad en la implementación de acciones del Comité de cuenca hidrográfica del río Chiriquí 108.
	F2	Infraestructura de la planta potabilizadora de Los Algarrobos del IDAAN (parte media y baja).	D2	Contaminación de afluentes de la subcuenca por el vertimiento de aguas residuales de proyectos urbanísticos.
	F3	Existencia de una mini red hidrometeorológica operada por miembros de la comunidad y reciben asistencia técnica del Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMPHA).	D3	Los equipos de la mini red hidrometeorológica no son automatizados (pluviómetros y limnógrafos).

	F4	Administración del agua en las zonas rurales por las Juntas de Administración de Acueductos Rurales (JAAR ´s) en la parte alta y media de la subcuenca.	D4	Inexistencia de acuerdo municipal para la protección de las zonas de recarga hídrica (ZRH) en la subcuenca del río David.
	F5	Presencia de grupos de ONG ´s ambientales, asociaciones de productores y la participación de comunidad local en temas interés ambiental en la subcuenca.	D5	Debilidad en la articulación de acciones entre las autoridades e instituciones del Estado para la protección y conservación de los recursos naturales y adaptación al cambio climático.
Análisis Externo	O	Oportunidades	A	Amenazas
	O1	Capacitar a los productores locales en prácticas agropecuarias sostenibles y resilientes al cambio climático.	A1	Variabilidad climática con efectos negativos en la producción agropecuaria y eventos climáticos extremos (inundaciones, deslizamientos, sequías, etc.).
	O2	Promover la participación comunitaria para la protección, manejo y gestión de los recursos hídricos.	A2	Conflictos entre usuarios del agua del sector agropecuario e industrial y JAAR ´s.
	O3	Fortalecimiento de las autoridades locales y en materia de legislación ambiental.	A3	Falta de liderazgo y compromiso por parte las autoridades locales en la aplicación de la legislación ambiental.
	O4	Impulsar el desarrollo de capacidades de las autoridades locales y la comunidad para la prevención de riesgo de desastres ambientales, mitigación y adaptación al cambio climático.	A4	Falta de dotación presupuestaria de las autoridades locales para la gestión ambiental en la subcuenca.
	O5	Desarrollar un Plan de ordenamiento territorial (POT) en el Distrito de Dolega.	A5	Incremento de problemáticas relacionadas al cambio de uso del suelo, manejo inadecuado de desechos, gestión del recurso hídrico y limitaciones institucionales en la gestión ambiental.

4.3.2 Valoración de los factores internos y externos del Análisis FODA

La Figura 33 presenta los resultados de la valoración de las matrices de los factores internos y externos del Análisis FODA de acuerdo a la evaluación de cada una de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas identificadas por los actores clave (Anexo 3 y 4). Se obtuvo un 33% de oportunidades y un 26% correspondiente a las fortalezas, en este sentido se considera que existen condiciones óptimas para la implementación de estrategias con la finalidad de integrar a las autoridades locales y la comunidad en general para desarrollar planes de acción destinados a la gestión de riesgo ambiental, adaptación y mitigación al cambio climático, incluyendo la necesidad de conservar y proteger los recursos naturales dentro de un plan de ordenamiento territorial.

Mientras que el 24% corresponde a las situaciones que representan las amenazas, es decir, los factores externos que podrían causar el aumento de riesgos de desastres por la variabilidad climática y la vulnerabilidad al cambio climático, afectando principalmente al desarrollo de las actividades agropecuarias y en el abastecimiento de agua potable para la planta potabilizadora

en las zonas urbanas y a las tomas de agua de las JAAR ´s en las zonas rurales. Con respecto a las debilidades, estas suponen un 17%, debido a las deficiencias en cuanto a prevención de riesgos ambientales, reducción de la vulnerabilidad al cambio climático y también se hizo hincapié en la débil integración de las autoridades locales, instituciones del Estado, grupos de ONG ´s, JAAR ´s y sociedad civil.

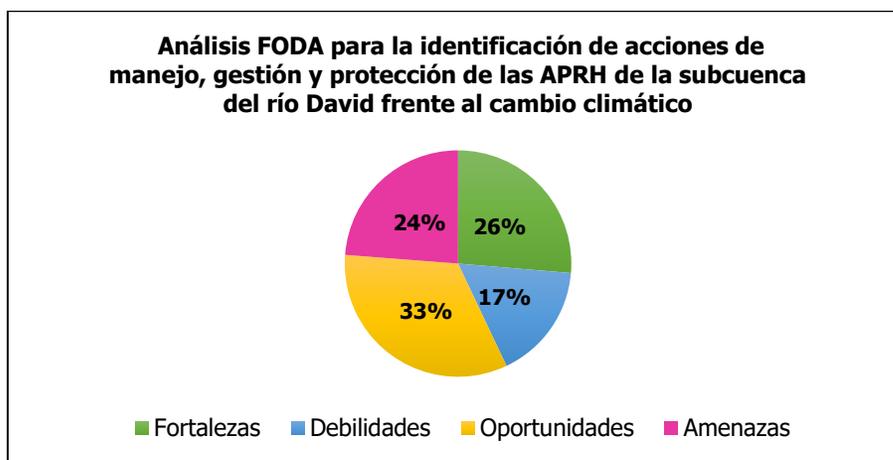


Figura 33. Análisis FODA para la identificación de acciones de manejo, gestión y protección de las APRH de la subcuenca del río David frente al cambio climático

De acuerdo al cálculo del índice de situación del Análisis FODA, se obtuvo un 38%, el cual indica que la subcuenca del río David presenta escenarios favorables para realizar estrategias en el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico frente al cambio climático. En este sentido, las fortalezas y oportunidades identificadas son mayores a las debilidades y amenazas, por lo tanto, se deben realizar acciones encaminadas mejorar las condiciones existentes con posibilidades de generar beneficios en el futuro.

Las oportunidades identificadas están dirigidas principalmente al desarrollo de estrategias entre las autoridades locales conformadas por los Municipios de David y Dolega, según la división político-administrativa del territorio y las comunidades de la subcuenca del río David para el fortalecimiento de capacidades materia de la aplicación y el cumplimiento de las normativas ambientales y en la prevención de riesgo de desastres, mitigación y adaptación al cambio climático. También, se hizo énfasis en la necesidad de capacitar a los productores locales en prácticas sostenibles y resilientes al cambio climático. Además, se propuso la elaboración de un Plan de ordenamiento territorial (POT) del distrito de Dolega.

Las fortalezas están enfocadas a reforzar las acciones para el manejo, gestión y protección de las APRH, en donde se resalta la importancia de la existencia del Comité de la cuenca hidrográfica del río Chiriquí (108), sin embargo, se deben brindar las herramientas para fortalecer las funciones asignadas a actores de esta estructura organizativa según el artículo 9 de la Ley N°44 de 2022. Además, se resalta la presencia activa de organizaciones de base comunitaria y organizaciones no gubernamentales dedicadas a la conservación y protección ambiental. Así como también, la existencia de asociaciones de productores orgánicos, de caña de azúcar y caprinocultores locales.

Entre las principales amenazas identificadas se encuentran los conflictos entre usuarios del agua, debido al uso ilegal de tomas de agua de los acueductos rurales, especialmente en época seca, la deforestación de los bosques de galería y la expansión de potreros producto de las actividades agropecuarias tradicionales como la roza, tumba y quema y el manejo inadecuado de agroquímicos y desechos sólidos en fincas.

Las debilidades están asociadas a principalmente a la carencia del fomento de la educación ambiental, a nivel de las autoridades locales y de la comunidad, haciéndose necesario la realización de campañas de difusión y sensibilización sobre la importancia de la protección y conservación de los recursos naturales, así como en el uso racional del agua en las actividades de uso doméstico, agropecuario e industrial. Se identificó que la inexistencia de un marco legal para la protección de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río David, genera conflictos entre usuarios de los acueductos rurales, finqueros y empresas del sector agropecuario que utilizan las fuentes superficiales de ríos, quebradas y pozos.

4.3.3 Estrategias para el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) frente al cambio climático en la subcuenca del río David

Se formuló un total de 12 estrategias con base en los aspectos priorizados de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas obtenidas de la situación actual del manejo, gestión y protección de las APRH frente al cambio climático en la subcuenca del río David e identificando a los responsables de ejecutar los planes de acción, los cuales deben abordar la participación de las autoridades locales, instituciones gubernamentales, ONG's, Juntas comunales, JAAR's, asociaciones de productores, comisiones ambientales y de salud a nivel local, y sociedad civil con el fin de desarrollar los lineamientos propuestos (Cuadro 16).

Los lineamientos de acción para solucionar la problemática analizada surgen de la visión compartida entre los actores clave de la subcuenca del río David realizada en el taller del DRP para el planteamiento de las Estrategias Ofensivas (F-O), Estrategias Defensivas (F-A), Estrategias de Reorientación (D-O) y Estrategias de Supervivencia (D-A) determinadas en la Matriz del Análisis FODA Cruzado (Anexo 5).

Principalmente, estos lineamientos buscan fortalecer y afianzar las relaciones que existen entre los distintos actores que intervienen en el manejo, gestión y protección de los recursos hídricos en la subcuenca del río David, tales como las autoridades locales de los Municipios de David y Dolega, el Comité de la cuenca hidrográfica (108), el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), las JAAR's y demás grupos organizados considerándose como una plataforma participativa para que se pueda llegar a procesos de concertación y toma de decisiones, propiciando procesos de buena gobernanza dentro del territorio.

Cuadro 16. Listado de los planes de acción identificados para el manejo, gestión y protección de las APRH frente al cambio climático en la subcuenca del río David

Estrategia	Descripción de la estrategia	Plan de acción	Responsable (s)
F1:01	Crear una red de fincas piloto y brindar asistencia técnica a los productores agropecuarios para generar capacidades para la adaptación al cambio climático.	Desarrollar programas de extensión rural para la implementación de prácticas agropecuarias con enfoque de adaptación al cambio climático en la subcuenca del río David.	Comité de cuenca del río Chiriquí (108) y el Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA)
F1:02	Realización de jornadas de reforestación en la subcuenca del río David involucrando a la población local (estudiantes, ONG´s, productores, empresas privadas y sociedad civil).	Establecer un vivero forestal para producción de plántones con la finalidad de reforestar la subcuenca del río David.	Comité de cuenca del río Chiriquí (108), productores agropecuarios y el Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE)
F5:04	Realizar un estudio de la vulnerabilidad climática actual y futura de la cuenca del río Chiriquí (108).	Gestionar el desarrollo de un estudio de la vulnerabilidad climática actual y futura de la cuenca del río Chiriquí (108).	MIAMBIENTE, Comité de cuenca del río Chiriquí (108) y los Municipios de David y Dolega.
F5:A1	Promover la cultura del uso eficiente del agua y evitar la contaminación de las fuentes hídricas en las comunidades.	Realizar campañas de sensibilización y educación ambiental sobre el uso eficiente del agua en la comunidad.	Grupos de ONG´s organizados en la subcuenca del río David y el Ministerio de Educación (MEDUCA).
F4:A2	Fortalecimiento financiero de las JAAR´s con apoyo de las autoridades locales.	Desarrollar un mecanismo de financiamiento para el mantenimiento de las JAAR´s en la subcuenca del río David.	JAAR´s y los Municipios de David y Dolega.
D1:03	Capacitar a los miembros del Comité 108 en la gobernanza, gestión y liderazgo de los recursos hídricos.	Realizar talleres de capacitación a los miembros del Comité 108 sobre la gobernanza, gestión y liderazgo del recurso hídrico.	MIAMBIENTE
D2:03	Fortalecer a la Comisión de la sociedad civil y la autoridad municipal de Dolega para el monitoreo de las aguas residuales de proyectos urbanísticos en el distrito.	Gestionar recursos para el financiamiento de la Comisión de la sociedad civil y la autoridad municipal de Dolega para la realización de acciones de monitoreo de las aguas residuales.	Municipio de Dolega, Comisión de la sociedad civil y el Ministerio de Salud (MINSA).
D3:05	Implementar equipos automatizados para mejorar la toma y gestión de datos de la mini red hidrometeorológica en la subcuenca del río David.	Gestionar recursos para la adquisición de equipos automatizados para la mini red hidrometeorológica en la subcuenca del río David.	Comité de cuenca 108 y la Asociación Ecologista de Panamá COLIBRÍ.
D5:05	Desarrollar el Plan de Ordenamiento Territorial del distrito de Dolega.	Coordinar la elaboración e implementación del Plan de Ordenamiento Territorial del distrito de Dolega.	Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MIVIOT) y el Municipio de Dolega

D4:A2	Proteger las zonas de recarga hídrica para los usuarios de las JAAR ´s en la subcuenca del río David.	Crear de un acuerdo municipal del distrito de Dolega para la protección de las zonas de recarga hídrica para los usuarios de las JAAR ´s en la subcuenca del río David.	Municipio de Dolega, la Comisión de la sociedad civil y el Ministerio de Salud (MINSA).
D5:A3	Fortalecer a las autoridades locales en el marco del cumplimiento de la legislación ambiental sobre los usuarios de la subcuenca del río David.	Fortalecer los mecanismos de acción de las autoridades para solucionar conflictos entre los distintos usuarios de la subcuenca del río David.	Municipios de David y Dolega, MIAMBIENTE y MINSA.
D5:A4	Gestionar convenios y acuerdos con organismos o entidades orientados a financiar determinadas actividades y/o proyectos con enfoque de cuenca.	Establecer alianzas estratégicas a nivel nacional e internacional para llevar a cabo proyectos de inversión en protección del medio ambiente y adaptación al cambio climático.	MIAMBIENTE, Comité de cuenca 108 y autoridades municipales de David y Dolega

A continuación, en el Cuadro 17 se presenta el orden de las estrategias de acción para el manejo, gestión y protección de las áreas potenciales de rendimiento hídrico de la subcuenca del río David frente a los impactos del cambio climático, de acuerdo al enfoque de cuencas hidrográficas divididas en: corto plazo (3 años), mediano plazo (5-8 años) y largo plazo de (8-10 años). Las estrategias se agruparon según el sector a impactar como: agropecuario y seguridad alimentaria, agua potable y saneamiento, biodiversidad, ordenamiento territorial y riesgos de desastres ambientales e institucional.

Cuadro 17. Planes de acción a corto, mediano y largo plazo para el manejo, gestión y protección de las APRH frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río David

Sector	Plan de acción	Plazo	Actividades
Agropecuario y seguridad alimentaria	Desarrollar programas de extensión rural para la implementación de prácticas agropecuarias con enfoque de adaptación al cambio climático en la subcuenca del río David.	Corto plazo	→ Fortalecer las capacidades de los productores locales e impulsar la agricultura familiar para mejorar la seguridad alimentaria con prácticas adaptadas al cambio climático.
Agua potable y saneamiento	Desarrollar un mecanismo de financiamiento para el mantenimiento de las JAAR ´s en la subcuenca del río David.	Mediano plazo	→ Asignar un fondo para el sector hídrico, a través de las autoridades locales para apoyar a los costos operativos y de mantenimiento de las JAAR ´s.
	Gestionar recursos para el financiamiento de la Comisión de la sociedad civil y la autoridad municipal de Dolega para la realización de acciones de monitoreo de las aguas residuales.	Mediano Plazo	→ Fortalecimiento de las capacidades técnicas y administrativas de las autoridades locales para cumplir las disposiciones legales sobre calidad de agua y de las fuentes hídrica.
	Crear de un acuerdo municipal del distrito de Dolega para la protección de las zonas de recarga hídrica para	Corto plazo	→ Delimitación física y protección de las zonas de nacimiento de ríos y

	los usuarios de las JAAR´s en la subcuenca del río David.		recarga hídrica, a través de un marco legal.
Biodiversidad	Establecer un vivero forestal para producción de plantones con la finalidad de reforestar la subcuenca del río David.	Largo Plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Diseño y construcción de un vivero forestal con el apoyo técnico de MIAMBIENTE y MIDA. → Desarrollar un programa local de reforestación para la protección de las zonas hídricas, en especial los nacimientos de los ríos, zonas de recarga y restauración de suelos y bosques de galería.
Educación ambiental	Realizar campañas de sensibilización y educación ambiental sobre el uso eficiente del agua en la comunidad.	Corto plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Realizar alianzas con el Ministerio de Educación para promover la educación ambiental en colegios y escuelas. → Organizar talleres para socializar en las comunidades temas de interés para el uso eficiente de los recursos hídricos.
	Realizar talleres de capacitación a los miembros del Comité 108 sobre la gobernanza, gestión y liderazgo del recurso hídrico	Mediano plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Formular instrumentos de gestión en el marco de la planificación participativa para la gobernanza
Ordenamiento territorial	Coordinar la elaboración e implementación del Plan de Ordenamiento Territorial del distrito de Dolega.	Largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Diseño y ejecución del Plan de ordenamiento territorial (POT) del Municipio de Dolega, a través del MIVIOT y autoridades locales.
Riesgos ambientales	Gestionar el desarrollo de un estudio de la vulnerabilidad climática actual y futura de la cuenca del río Chiriquí (108)	Mediano plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Crear programas de fortalecimiento de capacidades a las autoridades locales y población en materia del cambio climático, gestión integral de riesgo de desastres y gestión integral del recurso hídrico.
	Gestionar recursos para la adquisición de equipos automatizados para la mini red hidrometeorológica en la subcuenca del río David.	Largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Desarrollo de un sistema de alerta temprana comunitario para la reducción del riesgo ambiental.
Institucional	Fortalecer los mecanismos de acción para solucionar conflictos entre los distintos usuarios de la subcuenca del río David.	Mediano plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Realizar programas dirigidos a fortalecer las capacidades técnicas de funcionarios de las autoridades e instituciones locales que tienen competencia directa en la gestión de los recursos naturales de la cuenca hidrográfica 108.
	Establecer alianzas estratégicas a nivel nacional e internacional para llevar a cabo proyectos de inversión en protección del medio ambiente y adaptación al cambio climático.	Largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> → Formular proyectos y/o programas para la gestión del riesgo ambiental, adaptación y mitigación al cambio climático.

5. Análisis de la experiencia

En el desarrollo de esta investigación, se realizó el análisis de la disponibilidad actual y futura del agua en la subcuenca del río David, a través del uso del programa de modelación hidrológica InVEST, específicamente con el modelo Annual Water Yield, en donde la exploración de este programa sirvió para generar información preliminar sobre la producción de agua y a su vez identificar las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) en el área de estudio.

Debido a que el modelo AWY requiere utilizar como parámetros de entrada, mapas de tipo ráster del área de estudio para las variables de precipitación y evapotranspiración, además de los atributos biofísicos como el coeficiente de evapotranspiración (K_c), el contenido de agua para las plantas y la profundidad de restricción radical de las diferentes clases de uso de la tierra y cobertura terrestre, el estudio implicó la elaboración de estos insumos. Siendo necesario la búsqueda de datos en plataformas globales, solicitar información a las instituciones gubernamentales del país, así como también, se utilizaron programas adicionales para el procesamiento de los datos como: RStudio, SPAW, QGIS y ArcGIS.

Para el análisis de las variaciones espaciotemporales de la disponibilidad actual y futura del agua, se planteó estimar el rendimiento hídrico actual utilizando la plataforma climática global WorldClim para obtener datos con alta resolución espacial, permitiendo sustituir el uso de registros de estaciones meteorológicas, además de generar homogeneidad entre los datos para el cálculo del rendimiento hídrico en los escenarios de cambio climático. Esto se realizó, debido a que en la investigación se utilizaron los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050 del MCG FIO-ESM-2-0, obtenidos de la Dirección de Cambio Climático de MIAMBIENTE, cuyas proyecciones climáticas futuras pertenecen a la sexta fase del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP6) y se encuentran disponibles en esta plataforma.

Mientras que, para la obtención de los datos sobre el uso del suelo y cobertura terrestre, se utilizó la información del mapa de uso de la tierra y cobertura boscosa a nivel nacional y se obtuvo el dato del agua disponible para las plantas, a partir del mapa de textura de los suelos y materia orgánica del país y del procesamiento de los datos en el programa SPAW. Además, se utilizó la base de datos la plataforma global World Soil Information para generar el dato de la profundidad de la restricción radical del área de estudio.

Al realizar la revisión bibliográfica de otros estudios en los que se simuló el rendimiento hídrico, estos indican que las principales limitaciones que presenta el modelo AWY de InVEST es que no considera la variabilidad estacional de la precipitación, el agua subterránea o los patrones complejos de uso de la tierra o geología subyacente que pueden inducir a balances de agua complejos y ser captados de manera inexacta.

A pesar de estas limitaciones, el modelo AWY es ampliamente considerado como una herramienta adecuada para la evaluación de una variedad de servicios ecosistémicos (SE) dentro de cuencas hidrográficas caracterizadas por una baja disponibilidad de datos y se puede utilizar para cuantificar y mapear los SE con relativa rapidez. El modelo AWY es determinista, posee una representación simplificada del ciclo hidrológico y está basado en un código relativamente simple que los usuarios pueden ajustar según sea necesario.

En el caso de esta investigación, las limitaciones presentadas están relacionadas a la poca disponibilidad de datos específicos requeridos por el modelo AWY, como los registros faltantes de la precipitación y temperatura en las estaciones meteorológicas localizadas en el área de estudio, falta de equipos y recursos para realizar el muestreo y análisis de laboratorio de la textura del suelo y materia orgánica, ya que esto ayudaría a corroborar la información obtenida a nivel nacional y así generar el dato del agua disponible para las plantas. También, para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, se utilizó el método de Hargreaves, sin embargo, debido a la complejidad del cambio climático, este afecta a los patrones de precipitación y temperaturas, lo que influye en la simulación de producción de agua.

Otro de los factores de suma importancia para comprender el rendimiento hídrico en las cuencas hidrográficas son las dinámicas en los cambios del uso de la tierra y cobertura terrestre, debido a que la intensidad en los cambios se origina por la acción antropogénica y afectan al incremento o disminución del rendimiento hídrico. En el estudio, se contempló la utilización del mapa de cobertura y uso de la tierra para Panamá al año 2021. Esto permitió generar una línea base de la situación actual del rendimiento hídrico. Por lo tanto, en el futuro será necesario expandir aún más la escala de tiempo del estudio y evaluar los impactos del cambio climático en la producción de agua.

Si bien el uso de datos de plataformas globales representa en cierta forma un nivel de incertidumbre, porque generalmente se presentan en una escala relativamente grande y lo ideal sería trabajar con información a más detalle del área de estudio. Los resultados obtenidos en la investigación aun así pueden presentar las variaciones del rendimiento hídrico para el escenario actual y en los escenarios de cambio climático, proporcionando una referencia técnica y científica para la utilización de los recursos hídricos en la subcuenca del río David. Sin embargo, se reconoce que la precisión de la estimación del rendimiento hídrico depende de la cuidadosa selección de datos para los parámetros de entrada del modelo AWY, especialmente la precipitación y evapotranspiración a las que el rendimiento hídrico es más sensible.

En este sentido, los mapas obtenidos del rendimiento hídrico permitieron representar la producción de agua, su distribución en el paisaje y analizar la variación del RH actual y en los escenarios de cambio climático, ofreciendo información sobre la disponibilidad actual y los posibles cambios en el suministro de agua para uso humano y los ecosistemas. Además, de identificar problemáticas existentes en el área de estudio para la regulación y suministro de agua para los diferentes usuarios.

Por lo tanto, los mapas obtenidos sirvieron como una herramienta básica, ya que fueron elementos de apoyo para la formulación de los lineamientos de manejo, gestión y protección de las APRH propuestos por los actores clave de la subcuenca del río David. Para esta actividad, se realizó un Análisis FODA con la finalidad de formular planes de acción a corto, mediano y largo plazo con enfoque de cuencas, a fin de identificar las áreas con mayor vulnerabilidad a los impactos del cambio climático y ayudar a tomar decisiones directas sobre el uso de la tierra y cobertura terrestre para mantener o mejorar el suministro del recurso hídrico.

6. Conclusiones

- La estimación del rendimiento hídrico (RH) promedio anual permitió determinar las diferencias entre la producción actual y futura de agua en la subcuenca del río David, aplicando el modelo Annual Water Yield de InVEST. Se obtuvo un valor de RH para el escenario actual de 2,104.98 mm/año, en el escenario SSP1-2.6 de 2,053.72 mm/año al 2030 y de 2,153.72 mm/año al 2050, y en el escenario SSP5-8.5 se estimó en 2,028.97 mm/año y 2,017.35 mm/año para los períodos 2030 y 2050, respectivamente.
- La investigación brinda una perspectiva del comportamiento futuro del RH en el área de estudio, basado en el uso de las proyecciones climáticas de los escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050, utilizando el modelo climático global FIO-ESM-2-0 cuyos datos corresponden a la Región del Pacífico Occidental de Panamá. Así, la aplicación del modelo contribuye a generar información de base sobre el cambio climático, tomando en cuenta los tres modelos climáticos globales que mejor se adecuan a Panamá, de acuerdo con la Dirección de Cambio Climático de MIAMBIENTE.
- Las variaciones del RH promedio anual entre el escenario actual y los escenarios de cambio climático indican que en el SSP1-2.6 (escenario sustentable) se presentaría una reducción del 2.5% del RH para el 2030 y un aumento del 2.3% para el 2050. En comparación con el escenario SSP5-8.5 (basados en combustibles fósiles), se observó una disminución del 3.6% y 4.2% del RH en los períodos 2030 y 2050 respectivamente.
- Los cambios en el rendimiento hídrico futuro varían entre los escenarios de cambio climático, dando lugar a una incertidumbre respecto a las proyecciones climáticas utilizadas. El modelo climático global FIO-ESM-2-0 concuerda con una disminución en los valores del RH y de la precipitación (PPT) en el escenario SSP5-8.5 hacia los años 2030 y 2050, y de manera similar ocurre en el escenario SSP1-2.6 para el 2030. No obstante, se encontró que los valores del RH y PPT podrían aumentar en el escenario SSP5-8.5 para el año 2050. Por lo tanto, se puede indicar que los incrementos o disminuciones en la precipitación tienen un impacto directo en el rendimiento hídrico.
- De acuerdo con la distribución proyectada del RH en la subcuenca del río David en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los años 2030 y 2050, se prevé que el RH aumentará en las zonas medias y bajas, mientras que se espera una disminución en las zonas altas de producción hídrica. Sin embargo, en el escenario actual, los mayores incrementos más notables en el rendimiento hídrico se encuentran entre las partes altas y medias de la subcuenca, en comparación con las partes bajas, donde se registran los valores más bajos de rendimiento hídrico.
- El mapeo de los cambios en las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) permitió identificar que estos cambios tendrán una distribución geoespacial similar en el territorio de la subcuenca del río David. En el escenario SSP1-2.6, se prevé una variación en las APRH entre el 9% y 7.9% para los años 2030 y 2050, respectivamente. En contraste, en el

escenario SSP5-8.5, se estima que los cambios en las APRH oscilarán entre el 14% y 16.2% para los años 2030 y 2050, respectivamente.

- La categorización de las áreas potenciales de rendimiento hídrico (APRH) en la subcuenca del río David permitió una visualización geoespacial que muestra una mayor distribución superficial en las categorías de PRH de media y alta, en contraste con las categorías de PRH de baja y muy alta. Esto sugiere la posibilidad de un aumento futuro en el rendimiento hídrico en estas áreas, de acuerdo con los escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050.
- En la valoración de los factores internos y externos del análisis FODA con enfoque de planificación estratégica de cuencas hidrográficas, se encontró que las oportunidades representan un 33%, mientras que las fortalezas alcanzaron el 26%. En cambio, las amenazas y debilidades presentaron un porcentaje menor, con un 24% y 17%, respectivamente. Por lo tanto, se identifican condiciones favorables para aprovechar y mejorar las condiciones existentes en la subcuenca del río David, con el propósito de implementar planes de acción en el manejo, gestión y protección de las APRH frente al cambio climático.
- A partir de los planes de acción propuestos en la investigación, se concluye que resulta fundamental contar con la participación activa de los diversos actores clave de la subcuenca del río David. Esto garantizará que las estrategias identificadas se desarrollen a corto (3 a 5 años), mediano (de 5 a 8 años) y largo plazo (de 8 a más de 12 años), y se genere de esa manera un cambio en la manera en que actualmente se manejan los recursos naturales, especialmente el agua dentro del territorio.

7. Recomendaciones

- Para la estimación del RH en el escenario actual, es recomendable utilizar los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio con la finalidad de realizar la simulación a partir de datos más precisos y a su vez podría servir como insumo para realizar un análisis de retrospectiva del RH, a través del modelo AWY de InVEST.
- En el estudio de investigación, se realizó la estimación del rendimiento hídrico a nivel de subcuenca, obteniéndose resultados de forma general de la producción de agua. Para un análisis más detallado, es recomendable interpretar los resultados del modelo Annual Water Yield a nivel de microcuencas o unidades hidrológicas y correlacionar el rendimiento hídrico con la elevación de la subcuenca del río David en partes altas, medias y bajas.
- En relación al parámetro de uso de la tierra y cobertura terrestre, se recomienda estimar el RH a partir de un mapa ráster más detallado, es decir, subdividiendo las categorías según el Sistema de clasificación de cobertura y uso de la tierra para Panamá desarrollado por MIAMBIENTE, el cual se divide en cuatro niveles jerárquicos (ecosistema y uso, cobertura, tipo y subtipo).

- Para la estimación del rendimiento hídrico futuro, sería recomendable proyectar el uso del suelo y cobertura terrestre de la subcuenca del río David hacia los horizontes 2030 y 2050, según los escenarios de cambio climático utilizados en el Modelo Climático Global FIO-ESM-2-0 para tener una mejor representación de los posibles cambios de las dinámicas del LULC y su efecto en el RH y no considerarlo estático como se llevó a cabo en el presente estudio.
- Los planes de acción propuestos deben hacer énfasis en la realización de estrategias de intervención en las áreas potenciales de rendimiento hídrico, especialmente en aquellas zonas en las que se determinaron cambios de las categorías de PRH. Sin embargo, es imprescindible considerar el contexto territorial de la subcuenca para la toma de decisiones entre las autoridades locales y las comunidades.
- El análisis del RH desarrollado en la investigación ayuda conocer la distribución de este servicio ecosistémico en la subcuenca del río David para el escenario actual y futuro de cambio climático. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio para determinar el nivel de exposición a las amenazas climáticas, identificar el grado de sensibilidad a los cambios en los patrones del clima y evaluar la capacidad adaptativa de la población frente al cambio climático.

8. Referencias bibliográficas

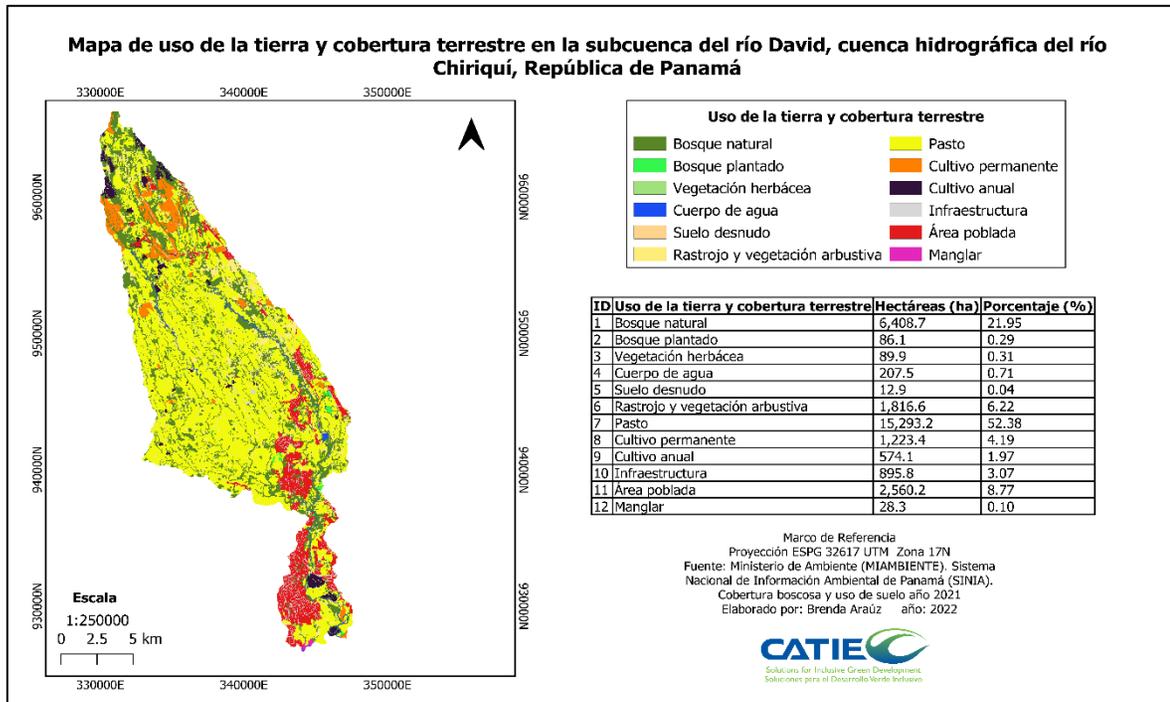
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2022. Prospectiva de las tendencias y escenarios de la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (en línea). Consultado 3 jul. 2022. Disponible en <https://publications.iadb.org/es/prospectiva-tendencias-y-escenarios-de-la-disponibilidad-de-recursos-hidricos-en-la-cuenca>
- Cárdenas, G. 2021. Variabilidad de la precipitación en la ciudad de Panamá año 1900 a 2016 (en línea). Cápsula Ambiental. Consultado 30 jun. 2023. Disponible en https://www.academia.edu/50798127/VARIABILIDAD_DE_LA_PRECIPITACION_EN_LA_CIUADAD_DE_PANAMA_1900_A
- Cárdenas, G. 2022. Actualización de Escenarios de Cambio Climático para la República de Panamá períodos 2030, 2050 y 2070. Vías Socioeconómicas SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (en línea). ciudad de Panamá, Panamá. Dirección de Cambio Climático (DDC), Ministerio de Ambiente. 175 p. Consultado 1 jul. 2023. Disponible en <https://adaptacion.miambiente.gob.pa/escenario-cc/>
- CATHALAC (Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe). 2017. Evaluación de Necesidades Tecnológicas ante el Cambio Climático. Análisis de Barreras y Ambiente Propicio Sector Recursos Hídricos Subsector Agua potable y saneamiento (en línea). Consultado 2 jul. 2022. Disponible en <https://tech-action.unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/2/2018/04/panama-baef-adaptacion.pdf>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). Cambio climático en Centroamérica: impactos potenciales y opciones de política pública (en línea). Consultado 15 jun. 2022. Disponible en <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/39149>
- CIIFEN. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. 2022. Escenarios y proyecciones (en línea). Consultado 5 jul. 2023. Disponible en <https://ciifen.org/escenarios-y-proyecciones/>
- CONADES (Consejo Nacional de Desarrollo Sostenible). 2012. Proyecto de Asistencia Técnica en el Manejo y Protección de las Fuentes de Agua en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de los Algarrobos en la provincia de Chiriquí. 117 p.
- CONAGUA (Consejo Nacional del Agua). 2016. Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos, República de Panamá. Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica. 170 p.
- Domínguez et al. 2010. Herramientas para la implementación de un Sistema de Gestión de Cuencas utilizando como base de respuesta la unidad ecosistémica del Río David. Universidad Tecnológica de Panamá. 353 p.
- Elliott K., Caldwell, P., Brantley, S., Miniati, C., Vose, J. y Swank, W. 2017. Rendimiento hídrico después de transiciones bosque-pasto-bosque. Hydrology and Earth System Sciences, 21(2), 981-997.

- Escoto, A., Sánchez, P., y Gachuz, S. 2017. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669-693.
- Fondo de Adaptación. 2019. Curso internacional sobre Adaptación al Cambio Climático: papel de los Servicios de los Ecosistemas "Manejo del Software InVEST". Consultado 22 jun. 2023. Disponible en <https://adaptacion.miambiente.gob.pa/project/gestion-de-conocimiento/#1671442148985-1048f23c-7c48>
- García, K., Del Castillo, L., y Saavedra, C. 2020. Análisis de anomalías climáticas para la cuenca del río La Villa, Panamá, basado en los escenarios RCP. *Revista de I+D Tecnológico* 16 (1): 1-7.
- IDAAN (Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales). Boletín Estadístico (en línea). 2022. N°35, 2018-2021. Consultado 25 jun. 2022. Disponible en <https://www.idaan.gob.pa/boletin-estadisticos-historico/>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo). 2010. Boletín de estimaciones y proyecciones de la población en la República de Panamá. Período 2010-2022. Disponible en https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=499&ID_CATEGORIA=3&ID_SUBCATEGORIA=10
- Jafarzadeh, A., Mahdavi, A., FallahShamsi, R., y Yousefpour, R. 2019. Estimación del rendimiento anual de agua para diferentes usos de la tierra mediante el modelo InVEST basado en GIS (estudio de caso: cuenca de captación de Mish-khas, provincia de Ilam, Irán. *Revista de ciencia de los pastizales*, 9 (1), 1-12.
- Li G, Jiang C, Zhang Y, y Jiang G. 2021. Whether land greening in different geomorphic units are beneficial to water yield in the Yellow River Basin?. *Ecological Indicators*. 120, 106926. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106926>
- Lovera, V., Roldán, I., Sánchez, J., y Torres, P. 2018. Evaluación del ecosistema de servicios de rendimiento hídrico a partir de un análisis del paisaje en el Municipio de Valle de Bravo, México. *Papeles de Geografía*. (64), 93-113.
- Lu, H. Yan, Y. Zhu, J., Jin, T. Liu, G. Wu, G. Stringer, L., y Dallimer, M. Spatiotemporal variations of water yield and prominent factors in the Lhasa River Basin, Tibetan Plateau .2020. *Water* 12, 1498. <https://doi.org/10.3390/w12051498>
- MIAMBIENTE (Ministerio de Ambiente). 2019. Tercera Comunicación Nacional (TCN) de Panamá sobre Cambio Climático (en línea). Consultado 12 jul. 2023. Disponible en <https://dcc.miambiente.gob.pa/biblioteca-climatica/>
- MIAMBIENTE. 2020. Cambio Climático en Panamá (en línea). Consultado 8 jul. 2023. Disponible en <https://dcc.miambiente.gob.pa/cambio-climatico-en-panama/>
- Minga, L. 2018. Análisis de cambio del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios climáticos futuros en la región sur del Ecuador. Tesis maestría. Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México. 126 p.

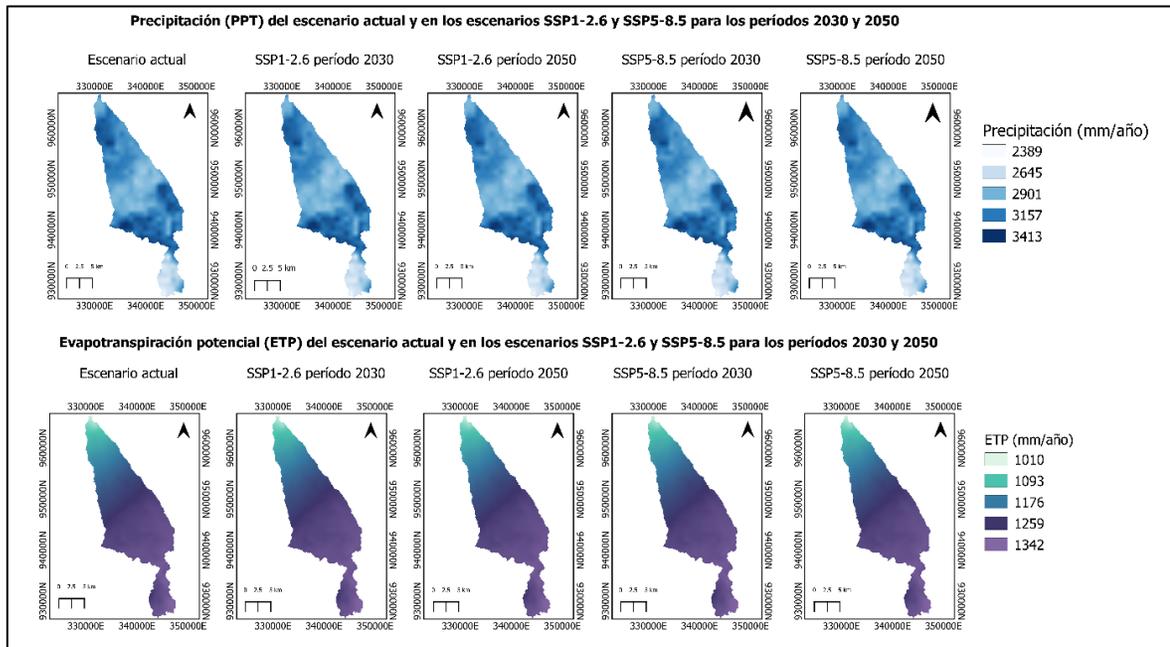
- Minga, S., Gómez, M., Bâ, K, Balcázar, L., Manzano-Solís, L., Cuervo, A., y Mastachi, C. 2018. Estimación de la producción de agua en las cuencas hidrográficas del sur del Ecuador Debates sobre hidrología y ciencias del sistema terrestre. 1-18.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2012. Glosario Hidrológico Internacional. 461 p. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8209
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Rechencq, M., García Asorey, M., Castiñeira, L., y Pascual, M. 2018. Producción de agua en la cuenca del río Limay: modelado y Calibración (en línea). CONICET Digital 43 (2), 3-23. Consultado 17 jul. 2023. Disponible en <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/85618>
- Sánchez, M., Benito, A., Passuello, A., Terrado, M., Ziv, G., Acuña, V., y Elorza, F. 2012. Análisis de sensibilidad de la valoración de los servicios ecosistémicos en una cuenca mediterránea. Ciencia del medio ambiente total, 440, 140-153.
- Sanjur, A. 2010. Estudio de la vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y evaluación de la capacidad local para la implementación de medidas de adaptación y mitigación en las cuencas de los ríos Tabasará y Chucunaque (en línea). Consultado 14 jul. 2023. Disponible en <http://www.mdgfund.org/node/4078>
- Natural Capital Project. 2022. InVEST 3.13.0 User's Guide (en línea). Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, and Stockholm Resilience Centre. Consultado 20 jun. 2022. Disponible en <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/es/index.html>
- Silva, G. 2005. La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico. Revista Geográfica Venezolana. 46 (1), 75-108.
- STRI (Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales). 2019. Capa de la capacidad agrológica de la República de Panamá. GIS Data Portal. <https://stridata-si.opendata.arcgis.com/datasets/SI::agrolological-capacity-of-panama-layer/about>
- Vega, V. 2012. Análisis de la Gestión del Recurso Hídrico en Panamá. Tesis de máster. Alicante, España Universidad de Alicante, p.93. <https://iuaca.ua.es/master-agua/documentos/gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm06/tfm-valery-vega-cervera.pdf>
- Wei, P., Chen, S., Wu, M., Deng, Y.m Xu, H., Jia, Y., y Liu, F. 2021.Utilización del modelo InVEST para evaluar el impacto de los cambios climáticos y del suelo en el rendimiento hídrico de las regiones aguas arriba de la cuenca del río Shule. Water, 13(9), 1250. en <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/9/1250>
- Yu, Y., Sun, X., Wang, J., y Zhang, J. 2022. Uso de InVEST para evaluar los servicios de rendimiento de agua en Shangri-La, noroeste de Yunnan, China. (en línea). Peerj, 10, e12804.
- Zhang, C, Z., Li, W., Zhang, B., y Liu, M. 2012. Rendimiento de agua de la cuenca del río Xitiaoxi basado en el modelo InVEST. Journal of Resources and Ecology, 3(1), 50-54

9. Anexos

Anexo 1. Mapa de uso de la tierra y cobertura terrestre en la subcuenca del río David, cuenca hidrográfica del río Chiriquí, República de Panamá



Anexo 2. Mapa de las variables de precipitación (PPT) y evapotranspiración potencial (ETP) para el escenario actual y en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 para los períodos 2030 y 2050



Anexo 3. Matriz de evaluación de los factores externos

Evaluación	TIPO	Nº	Descripción	Importancia	Impacto	Tendencia	Puntuación
Factores internos (EFI)	Fortalezas	F1	Existencia del Comité de la cuenca hidrográfica del río Chiriquí (108).	Totalmente importante	Debil	Deficiente	20
Factores internos (EFI)	Fortalezas	F2	Infraestructura de la planta potabilizadora de Los Algarobos del IDAAN (parte media y baja).	Totalmente importante	Muy fuerte	Se mantiene	75
Factores internos (EFI)	Fortalezas	F3	Existencia de una mini red hidrometeorológica operada por miembros de la comunidad y reciben asistencia técnica del IMPHA (Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá).	Muy importante	Fuerte	Mejora	64
Factores internos (EFI)	Fortalezas	F4	Administración del agua en las zonas rurales por las Juntas de Administración de Acueductos Rurales (JAAR's) en la parte alta y media de la subcuenca.	Totalmente importante	Fuerte	Deficiente	40
Factores internos (EFI)	Fortalezas	F5	Presencia de grupos de ONG's ambientales, asociaciones de productores y la participación de comunidad local en temas de interés ambiental dentro de la subcuenca del río David.	Muy importante	Promedio	Mejora	48
Factores internos (EFI)	Debilidades	D1	Poca efectividad en la implementación de acciones del Comité de cuenca hidrográfica del río Chiriquí 108.	Muy importante	Muy fuerte	Mala	20
Factores internos (EFI)	Debilidades	D2	Contaminación de afluentes de la subcuenca por el vertimiento de aguas residuales de proyectos urbanísticos del distrito de Dolega.	Totalmente importante	Muy fuerte	Mala	25
Factores internos (EFI)	Debilidades	D3	Los equipos de la mini red hidrometeorológica no son automatizados (pluviómetros y limnigrafos).	Importante	Promedio	Mejora	36
Factores internos (EFI)	Debilidades	D4	Inexistencia de acuerdo municipal para la protección de las zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río David.	Totalmente importante	Muy fuerte	Mala	25
Factores internos (EFI)	Debilidades	D5	Debilidad en la articulación de acciones entre las autoridades e instituciones del Estado para la protección y conservación de los recursos naturales y adaptación al cambio climático.	Totalmente importante	Muy fuerte	Deficiente	50

Anexo 4. Matriz de evaluación de los factores externos

Evaluación	TIPO	Nº	Descripción	Importancia	Urgencia	Tendencia	Puntuación
Factores externos (EFE)	Oportunidades	O1	Capacitar a los productores locales en prácticas agropecuarias sostenibles y resilientes al cambio climático.	Importante	Urgente	Mucha mejora	60
Factores externos (EFE)	Oportunidades	O2	Promover la participación comunitaria para la protección, manejo y gestión de los recursos hídricos.	Importante	Urgente	Mejora	48
Factores externos (EFE)	Oportunidades	O3	Fortalecimiento de las autoridades locales y en materia de legislación ambiental.	Totalmente importante	Muy urgente	Mejora	100
Factores externos (EFE)	Oportunidades	O4	Impulsar el desarrollo de capacidades de las autoridades locales y la comunidad para la prevención de riesgo de desastres, mitigación y adaptación al cambio climático.	Muy importante	Urgente	Mejora	64
Factores externos (EFE)	Oportunidades	O5	Desarrollar un Plan de ordenamiento territorial en el Distrito de Dolega.	Totalmente importante	Urgente	Deficiente	40
Factores externos (EFE)	Amenazas	A1	Variabilidad climática con efectos negativos en la producción agropecuaria y eventos climáticos extremos (inundaciones, delgazamientos, sequías, etc.)	Totalmente importante	Muy urgente	Se mantiene	75
Factores externos (EFE)	Amenazas	A2	Conflictos entre usuarios del agua del sector agropecuario e industrial y las JAAR's.	Totalmente importante	Muy urgente	Deficiente	50
Factores externos (EFE)	Amenazas	A3	Falta de liderazgo y compromiso por parte las autoridades locales en la aplicación de la legislación ambiental.	Totalmente importante	Muy urgente	Mala	25
Factores externos (EFE)	Amenazas	A4	Falta de dotación presupuestaria de las autoridades locales para la gestión ambiental en la subcuenca.	Importante	Urgente	Mejora	48
Factores externos (EFE)	Amenazas	A5	Incremento de problemáticas relacionadas al cambio de uso del suelo, manejo inadecuado de los desechos, gestión del recurso hídrico y limitaciones institucionales en la gestión ambiental.	Totalmente importante	Muy urgente	Mala	25

Anexo 5. Matriz de factores internos y externos del Análisis FODA

		O	OPORTUNIDADES (O)	A	AMENAZAS (A)
		FACTORES EXTERNOS		O1	Capacitar a los productores locales en prácticas agropecuarias sostenibles y resilientes al cambio climático.
FACTORES INTERNOS		O2	Promover la participación comunitaria para la protección, manejo y gestión de los recursos hídricos.	A2	Conflictos entre usuarios del agua del sector agropecuario e industrial y las JAAR's.
		O3	Fortalecimiento de las autoridades locales y en materia de legislación ambiental.	A3	Falta de liderazgo y compromiso por parte las autoridades locales en la aplicación de la legislación ambiental.
		O4	Impulsar el desarrollo de capacidades de las autoridades locales y la comunidad para la prevención de riesgo de desastre	A4	Falta de dotación presupuestaria de las autoridades locales para la gestión ambiental en la subcuenca.
		O5	Desarrollar un Plan de ordenamiento territorial en el Distrito de Dolega.	A5	Incremento de problemáticas relacionadas al cambio de uso del suelo, manejo inadecuado de los desechos, gestión del recurso hídrico y limitaciones institucionales en la gestión ambiental.
FORTALEZAS (F)		F0	ESTRATEGIAS OFENSIVAS (F-O) ¿Cómo podemos usar una fortaleza para explotar una oportunidad?	FA	ESTRATEGIAS DEFENSIVAS (F-A) ¿Cómo podemos usar una fortaleza para minimizar o neutralizar una amenaza?
F1	Existencia del Comité de la cuenca hidrográfica del río Chiriquí (108).	F1:01	Crear una red de fincas piloto y brindar asistencia técnica a los productores agropecuarios para generar capacidades para la adaptación al cambio climático.	F5:A1	Promover la cultura del uso eficiente del agua y evitar la contaminación de las fuentes hídricas en las comunidades.
F2	Infraestructura de la planta potabilizadora de Los Algarrobos del IDAAN (parte media y baja).	F1:02	Realización de jornadas de reforestación en la subcuenca del río David involucrando a la población local (estudiantes, ONG's, productores, empresas privadas y sociedad civil).	F4:A2	Fortalecimiento financiero de las JAAR's con apoyo de las autoridades locales.
F3	Existencia de una mini red hidrometeorológica operada por miembros de la comunidad y reciben asistencia técnica del IMPHA (Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá).	F5:04	Realizar un estudio de la vulnerabilidad climática actual y futura de la cuenca del río Chiriquí (108).		
F4	Administración del agua en las zonas rurales por las Juntas de Administración de Acueductos Rurales (JAAR's) en la parte alta y media de la subcuenca.				
F5	Presencia de grupos de ONG's ambientales, asociaciones de productores y la participación de comunidad local en temas de interés ambiental dentro de la subcuenca del río David.				
DEBILIDADES (D)		D0	ESTRATEGIAS DE REORIENTACIÓN (D-O) ¿Cómo podemos corregir una debilidad para poder aprovechar una oportunidad?	DA	ESTRATEGIAS DE SUPERVIVENCIA (D-A) ¿Cómo vamos a trabajar una debilidad para minimizar el efecto de una amenaza?
D1	Poca efectividad en la implementación de acciones del Comité de cuenca hidrográfica del río Chiriquí 108.	D1:03	Capacitar a los miembros del Comité 108 en gobernanza, gestión y liderazgo de los recursos hídricos.	D4:A2	Proteger las zonas de recarga hídrica para los usuarios de las JAAR's en la subcuenca del río David.
D2	Contaminación de afluentes de la subcuenca por el vertimiento de aguas residuales de proyectos urbanísticos del distrito de Dolega.	D2:03	Fortalecer a la Comisión de la sociedad civil y la autoridad municipal de Dolega para el monitoreo de las aguas residuales de proyectos urbanísticos en el distrito.	D5: A3	Fortalecer a las autoridades locales en el marco del cumplimiento de la legislación ambiental sobre los usuarios de la subcuenca del río David.
D3	Los equipos de la mini red hidrometeorológica no son automatizados (pluviómetros y limnigrafos).	D3:05	Implementar equipos automatizados para mejorar la toma y gestión de datos de la mini red hidrometeorológica en la subcuenca del río David.	D5:A4	Gestionar convenios y acuerdos con organismos o entidades orientados a financiar determinadas actividades y/o proyectos con enfoque de cuenca.
D4	Inexistencia de acuerdo municipal para la protección de las zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río David.	D5:05	Desarrollar el Plan de Ordenamiento Territorial del distrito de Dolega.		
D5	Debilidad en la articulación de acciones entre las autoridades e instituciones del Estado para la protección y conservación de los recursos naturales y adaptación al cambio				

Anexo 6. Rango de valores del índice de situación del Análisis FODA

SITUACIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO
MUY DESFAVORABLE	-200%	-100%
DESFAVORABLE	-100%	-30%
EQUILIBRIO	-30%	30%
FAVORABLE	30%	100%
MUY FAVORABLE	100%	200%

Anexo 7. Taller del Diagnóstico Rural Participativo (DRP) con actores clave de la subcuenca del río David



Anexo 8. Lista de asistencia del taller del Diagnóstico Rural Participativo (DRP) con actores clave de la subcuenca del río David

Listado de Asistencia del Taller DRP

Actividad: Taller Diagnóstico rural participativo (DRP) con actores clave de la subcuenca del río Chiriquí 108, cuenca del río Chiriquí 108, República de Panamá.

Objetivo: conocer la situación actual del manejo, gestión y protección del recurso hídrico y sensibilizar a los actores clave haciendo énfasis en el uso del agua, preservación de los ecosistemas y adaptación al cambio climático.

Facilitador: Ing. Brenda Araúz / Estudiante CATIE

Fecha: 20 de Julio de 2023

Lugar: Instalaciones de la Cadena de Frío de Dolega, La Acequia, distrito de Dolega, provincia de Chiriquí.

Nombre y Apellido	Género		Edad	Institución/ Organización /Grupo	Profesión/ Ocupación	Localidad	Firma
	M	F					
Silo Baya		✓	42	Ministerio de Ambiente David	de los recursos hídricos	David	[Firma]
Monsieur / Amador		✓	23	Ministerio de Ambiente David	participante	David	[Firma]
MELVA MENDOZA		✓	-	Vecinos Vigilantes Petrerillo	Docente	Potrerillos	[Firma]
Clara Jiménez		✓	-	Vecinos Vigilantes Petrerillo	ama	Potrerillos	[Firma]
Edisaura Jaramilla		✓	65	CR Dolega	Docente	Dolega	[Firma]
Luis C. Muñoz		✓	30	PNUMA/ MIAMBIENTE	Ing. Amb.	Dolega	[Firma]
Yancy Araya		✓	36	JAAR/Potrerillo	Chico	Potrerillo	[Firma]
Alfonso		✓	41	JAAR/Potrerillo	Chico	Potrerillo	[Firma]
Luis G. ...		✓	34	IDAAN	participante	Alvarado	[Firma]
Hilmar		✓	29	IDAAN	participante	Alvarado	[Firma]
María P. ...		✓	62	Colibri	participante	Potrerillo	[Firma]
Esteban ...		✓	30	Asociación Vecinos Chiriquí	participante	Idonia Beal	[Firma]
Raquel ...		✓	67	JAAR	participante	David	[Firma]
Jose ...		✓	51	J.C. Potrerillo	Abogado	Potrerillo	[Firma]
Alfonso ...		✓	61	Colibri	participante	Potrerillo	[Firma]
Filippo ...		✓	48	IMHPA	Hidrologo	Chiriquí	[Firma]
Diego ...		✓	64	Colibri	participante	Potrerillo	[Firma]
...		✓	43	Mi. Ambiente - SH	participante	David	[Firma]
...		✓	45	CR Dolega	participante	Dolega	[Firma]
...		✓	62	3R - APAD	participante	La Cequia	[Firma]
...		✓	46	MI DA	participante	Potrerillo	[Firma]
...		✓	72	MI DA	participante	Potrerillo	[Firma]
Nadia Samoniego		✓	40	Ing. Agron. Zool.	David	David	[Firma]
Luis Novira		✓	60	MIDA - POTRERILLO	participante	Dolega	[Firma]
...		✓	52	José de ...	participante	Potrerillo	[Firma]