

INFORME DE PASANTÍA INTERNACIONAL EN EL CENTRO DE
INVESTIGACIONES HIDRÁULICAS E HIDROTÉCNICAS (CIHH-UTP): APOYO
TÉCNICO AL PROYECTO IDDS-040 – EVALUACIÓN DEL POTENCIAL
HIDROGEOLÓGICO DE ZONAS VULNERABLES DE PANAMÁ: ARCO SECO

LICETH ROCIO VILLEGAS HOYOS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2026

INFORME DE PASANTÍA INTERNACIONAL EN EL CENTRO DE
INVESTIGACIONES HIDRÁULICAS E HIDROTÉCNICAS (CIHH-UTP): APOYO
TÉCNICO AL PROYECTO IDDS-040 – EVALUACIÓN DEL POTENCIAL
HIDROGEOLÓGICO DE ZONAS VULNERABLES DE PANAMÁ: ARCO SECO

LICETH ROCIO VILLEGAS HOYOS

Informe de pasantía internacional para obtener el título de Magíster en

Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental

Director: Carlos Andrés Caro Camargo

Doctor en Ingeniería Civil

Codirectora: Laura Natalia Garavito Rincón

Magíster en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2026

Nota de aceptación:

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 28 de septiembre, 2026

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2.1. ENFOQUE METODOLÓGICO.....	14
2.2. ÁREA DE ESTUDIO.....	15
2.3. MARCO DE REFERENCIA DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
2.3.1. Contexto climático	17
2.3.2. Contexto geológico e hidrogeológico.....	18
2.3.3. Antecedentes del Arco Seco y disponibilidad de aguas subterráneas 31	
2.4. RECOPIACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	20
2.5. RECONOCIMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	22
2.6. PREPROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOESPACIAL	23
2.7. CONSTRUCCIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT+	24
2.8. PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA	26
2.9. ACTIVIDADES DE CAMPO PARA EL MONITOREO HIDROGEOLÓGICO 31	
2.9.1. Protocolo de muestreo de agua subterránea	32
2.10. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	37
2.11. ORGANIZACIÓN, SISTEMATIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	39
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	41

3.1.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOESPACIAL.....	41
3.2.	RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SWAT+.....	49
3.3.	ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA.....	60
3.4.	RESULTADOS DEL MONITOREO HIDROGEOLÓGICO.....	65
3.5.	INTEGRACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO	70
3.6.	SEMINARIO DE SUSTENTACIÓN DE AVANCE Y APOORTE EN LA INVESTIGACIÓN.....	73
3.7.	MATRIZ DE CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.	74
4.	CONCLUSIONES	78
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y RECURSOS.....	80
5.1.	BIBLIOGRAFÍA	80
5.2.	RECURSOS.....	82
6.	APÉNDICES Y ANEXOS.....	83

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Criterios empleados para la generación de HRUs y delimitación de la red de drenaje	24
Tabla 2. Esquema temporal del procesamiento de datos meteorológicos y aplicación del Quantile Mapping	27
Tabla 3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el procesamiento hidroclimático y descarga de información en el NASA POWER.....	28
Tabla 4. Equipos utilizados durante las actividades de campo.....	38
Tabla 5. Análisis de sensibilidad global mediante el método Sobol para los parámetros hidrológicos de la cuenca del río La Villa.....	53
Tabla 6. Valores de ajuste porcentual de los parámetros empleados en la calibración del modelo SWAT+	55
Tabla 7. Comparación de los componentes del balance hídrico antes y después de la calibración – Cuenca río La Villa.....	58
Tabla 8. Comparación estadística entre las series de precipitación observadas y corregidas.....	63
Tabla 9. Pozos visitados e instrumentados durante la campaña de monitoreo.	68
Tabla 10. Matriz de seguimiento y cumplimiento de objetivos	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología empleada en la investigación.	15
Figura 2. Localización del área de estudio.....	17
Figura 3. Fuentes de información utilizadas durante la pasantía.	22
Figura 4. Flujo metodológico para la implementación del modelo hidrológico SWAT+	26
Figura 5. Implementación del Nasa Power Downloader para descarga de data satelital.....	28
Figura 6. Representación esquemática del método de corrección de sesgo mediante Quantile Mapping.....	29
Figura 7. Flujo metodológico para la corrección de datos mediante Quantile Mapping.....	31
Figura 8. Trayectoria de la exploración – pozos inspeccionados región de Azuero.	33
Figura 9. Modelo Digital de Elevación (MDE) procesado de las cuencas La Villa y Tonosí.....	42
Figura 10. Mapa de uso y cobertura del suelo.....	43
Figura 11. Validación visual de cartografía mediante imágenes satelitales.	44
Figura 12. Reclasificación de usos de suelo al SWAT Code.	45

Figura 13. Delimitación de las cuencas hidrográficas y red de drenaje generada en QSWAT+.....	46
Figura 14. Distribución de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs).....	47
Figura 15. Procesamiento en el plugins QSWAT+ para la cuenca río La Villa.	49
Figura 16. Componentes del balance hídrico de la cuenca del río La Villa obtenidos mediante SWAT+ Editor.	51
Figura 17. Ejemplo del análisis de sensibilidad de por parámetro analizado.....	53
Figura 18. Calibración del modelo SWAT+ con base en los parámetros identificados como sensibles mediante el análisis de sensibilidad.	54
Figura 19. Balance hídrico de la cuenca del río La Villa después del proceso de calibración mediante SWAT+ Toolbox.....	57
Figura 20. Comparación de los hidrogramas obtenidos con información climática original (observada) y corregida con la data simulada con el SWAT+.....	64
Figura 21. Caudal observado Est. Río La Villa – Atalayita (2002-2011)	65
Figura 22. Ubicación de los pozos monitoreados.	69

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Instalación de transductores de presión.	34
Fotografía 2. Configuración de los transductores de presión.....	35
Fotografía 3. Medición manual de niveles piezométricos.	35
Fotografía 4. Toma y preservación de muestras de agua subterránea.....	36
Fotografía 5. Reconocimiento del afloramiento termal.....	37
Fotografía 6. Presentación de los resultados del trabajo desarrollado durante la pasantía internacional.....	73
Fotografía 7. Participantes del seminario de sustentación de la pasantía internacional en el CIHH-UTP.....	74

RESUMEN

La presente pasantía internacional se desarrolló en el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), en el marco del proyecto de investigación IDDS-040: *Evaluación del Potencial Hidrogeológico de Zonas Vulnerables de Panamá: Arco Seco*, como opción de grado de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental de la Universidad Santo Tomás. La pasantía se desarrolló entre el 2 de marzo y el 24 de abril de 2026, con una duración de ocho semanas, y estuvo orientada al apoyo técnico en la caracterización hidrológica e hidrogeológica de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí.

Durante la pasantía se desarrollaron actividades relacionadas con el procesamiento de información geoespacial, la implementación del modelo hidrológico SWAT+, el procesamiento y corrección de información hidroclimática mediante Quantile Mapping, y el monitoreo de aguas subterráneas mediante actividades de campo e instrumentación de pozos. En la cuenca del río La Villa se obtuvieron 23 subcuencas y 452 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). La calibración del modelo presentó un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,712 a escala mensual. Asimismo, la aplicación de Quantile Mapping permitió obtener un error inferior al 0,14 % para el indicador utilizado en la evaluación de la corrección de las series de precipitación.

Como parte de las actividades de campo se realizaron visitas a los puntos de monitoreo seleccionados y se instalaron instrumentos para el seguimiento de los niveles piezométricos. Estas actividades permitieron complementar la información utilizada en la modelación hidrológica y aportar insumos para la evaluación del comportamiento del recurso hídrico en las cuencas estudiadas. En conjunto, los resultados obtenidos durante la pasantía contribuyeron al desarrollo técnico del proyecto IDDS-040 y permitieron fortalecer las competencias en modelación hidrológica, análisis espacial, procesamiento de información hidroclimática y monitoreo de aguas subterráneas.

Palabras clave: Arco Seco, hidrogeología, aguas subterráneas, SWAT+, Sistemas de Información Geográfica (SIG).

ABSTRACT

This international internship was carried out at the Hydraulic and Hydrotechnical Research Center (CIHH) of the Technological University of Panama (UTP), within the framework of the research project IDDS-040: *Assessment of the Hydrogeological Potential of Vulnerable Areas in Panama: Dry Arc*, as a degree requirement for the Master's Degree in Civil Engineering with an emphasis on Hydro-Environmental Engineering at Universidad Santo Tomás. The internship was conducted from March 2 to April 24, 2026, for a total duration of eight weeks, and focused on providing technical support for the hydrological and hydrogeological characterization of the La Villa and Tonosí river basins.

The activities included geospatial data processing, implementation of the SWAT+ hydrological model, processing and bias correction of hydroclimatic information using Quantile Mapping, and groundwater monitoring through field activities and well instrumentation. In the La Villa River basin, 23 sub-basins and 452 Hydrologic Response Units (HRUs) were generated. The model calibration yielded a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient of 0.712 at the monthly scale. Additionally, the application of Quantile Mapping resulted in an error of less than 0.14% for the indicator used to evaluate the correction of precipitation series.

As part of the field activities, selected monitoring points were visited and instruments were installed to monitor piezometric levels. These activities complemented the information used in hydrological modeling and provided inputs for assessing water resource behavior in the study basins. Overall, the results obtained during the internship contributed to the technical development of the IDDS-040 project and strengthened competencies in hydrological modeling, spatial analysis, hydroclimatic data processing, and groundwater monitoring.

Keywords: Arco Seco, hydrogeology, groundwater, SWAT+, Geographic Information Systems (GIS).

INTRODUCCIÓN

El agua constituye uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo social, económico y ambiental de los territorios. Su disponibilidad y calidad condicionan el abastecimiento para consumo humano, la producción agrícola, el desarrollo industrial y la conservación de los ecosistemas. En este contexto, las aguas subterráneas representan una fuente estratégica para garantizar la seguridad hídrica, especialmente en regiones donde la oferta de agua superficial es limitada o presenta una marcada variabilidad estacional. Su aprovechamiento sostenible requiere comprender las condiciones hidrogeológicas que controlan el almacenamiento, circulación y recarga de los acuíferos, así como los factores naturales y antrópicos que pueden afectar su disponibilidad y calidad.

Una de las regiones donde esta problemática adquiere especial relevancia es el Arco Seco de Panamá, caracterizado por presentar las menores precipitaciones del país, una marcada estacionalidad climática y una creciente presión sobre los recursos hídricos debido a las actividades agrícolas, pecuarias y al abastecimiento de la población. Estas condiciones han generado la necesidad de fortalecer el conocimiento sobre el comportamiento de las aguas subterráneas y generar información que contribuya a una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico.

En este contexto, el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) desarrolla el proyecto “Evaluación del Potencial Hidrogeológico de Zonas Vulnerables de Panamá: Arco Seco (IDDS-040)”, orientado al estudio de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. El proyecto integra actividades de monitoreo de aguas subterráneas, trabajo de campo, análisis de laboratorio, procesamiento de información geoespacial y modelación hidrológica, con el propósito de generar insumos técnicos para la comprensión de los sistemas hídricos de la región.

En este marco se desarrolló la presente pasantía internacional, como opción de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental de la Universidad Santo Tomás. La pasantía se realizó en el CIHH-UTP entre el 2 de marzo y el 24 de abril de 2026, correspondiente a ocho semanas de trabajo y 320 horas, de acuerdo con el plan de trabajo aprobado y bajo la orientación del Ph. D. Ing. Miguel Salceda G., tutor de la pasantía. Durante este

periodo se desarrollaron actividades de procesamiento y organización de información, modelación hidrológica, análisis de datos y trabajo de campo. Entre estas actividades se destaca la gira realizada del 30 de marzo al 1 de abril de 2026 en las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí, donde se efectuó el reconocimiento de sitios de monitoreo, medición de niveles piezométricos, instrumentación de pozos y toma de muestras de agua.

El objeto de este informe consiste en presentar y analizar las actividades desarrolladas durante la pasantía, evidenciando su contribución al proyecto de investigación y al fortalecimiento de las competencias adquiridas durante la formación de maestría. Asimismo, busca exponer la aplicación de herramientas y metodologías empleadas en la evaluación hidrológica e hidrogeológica del Arco Seco, así como el aporte de la experiencia internacional al desarrollo académico y profesional de la pasante.

Para el desarrollo de la pasantía se adoptó un enfoque metodológico que integró la recopilación y procesamiento de información geoespacial, modelación hidrológica mediante SWAT+, monitoreo hidrogeológico en campo, instrumentación de pozos, análisis de muestras de agua subterránea y tratamiento de información hidroclimática, con apoyo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramientas computacionales y técnicas de análisis de datos. Esta articulación permitió participar en diferentes etapas del proyecto y comprender la importancia de integrar información de diversas fuentes para la evaluación del potencial hidrogeológico de zonas vulnerables.

Finalmente, el informe se estructura en cuatro capítulos principales. El primero presenta los objetivos que orientaron el desarrollo de la pasantía; el segundo describe la metodología y las actividades realizadas; el tercero presenta y analiza los principales resultados obtenidos y su aporte al proyecto de investigación; y el cuarto expone las conclusiones derivadas de la experiencia, resaltando los aprendizajes alcanzados y la importancia de la investigación aplicada en ingeniería civil con énfasis hidroambiental.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Fortalecer las capacidades técnicas de la pasante a través del apoyo directo en actividades hidrogeológicas relacionadas con medición de niveles freáticos, análisis de calidad de agua, instrumentación, georreferenciación y modelación conceptual y numérica (SWAT+)

1.2 Objetivos Específicos

- 1.2.1. Desarrollar experiencia en mediciones piezométricas en campo en pozos de Azuero.
- 1.2.2. Apoyar en la instalación, descarga y mantenimiento de transductores de presión.
- 1.2.3. Realizar muestreos para análisis de nitratos (NO_3^-) y ortofosfatos (PO_4^{3-}).
- 1.2.4. Georreferenciar pozos y construir un inventario con atributos asociados.
- 1.2.5. Apoyar en la calibración de un modelo SWAT para las áreas de estudio, incluyendo procesamiento de imágenes ráster y uso de SIG.
- 1.2.6. Elaborar un informe técnico final y presentar un seminario de resultados y aprendizajes.

2. METODOLOGÍA

En los siguientes apartados se describen de manera detallada las etapas metodológicas desarrolladas durante la pasantía, organizadas de acuerdo con la secuencia lógica de ejecución del proyecto. Para cada una de ellas se presentan los procedimientos implementados, las herramientas empleadas y su contribución al cumplimiento de los objetivos de la investigación.

2.1. Enfoque Metodológico

El desarrollo metodológico estuvo orientado a apoyar las diferentes etapas técnicas de la investigación mediante la integración de actividades de oficina, trabajo de campo, procesamiento de información geoespacial, modelación hidrológica y análisis de información hidroclimática, con el propósito de aportar insumos para la caracterización hidrogeológica de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí.

La metodología adoptada respondió a un proceso secuencial que inició con la recopilación y organización de la información básica necesaria para la implementación del modelo hidrológico, continuó con el procesamiento de información espacial mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la configuración y parametrización del modelo SWAT+, el desarrollo de campañas de monitoreo hidrogeológico para la obtención de información primaria y, finalmente, el procesamiento, sistematización y análisis de los datos obtenidos durante la pasantía. Esta secuencia permitió integrar información procedente de diferentes fuentes institucionales y observaciones de campo, garantizando la coherencia entre los insumos empleados durante el desarrollo del proyecto.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo se fundamentó en la articulación de herramientas computacionales especializadas para el análisis hidrológico e hidrogeológico, entre ellas QGIS, ArcGIS Pro, QSWAT+, SWAT Editor, SWAT Toolbox y Python, complementadas con actividades de instrumentación de pozos, medición de niveles piezométricos, toma de muestras de agua subterránea y procesamiento de información climática. La integración de estas herramientas permitió abordar el estudio desde una perspectiva multidisciplinaria, combinando análisis espacial, modelación numérica y monitoreo de campo para apoyar la evaluación del potencial hidrogeológico del Arco Seco panameño.

Con el fin de facilitar la comprensión del procedimiento desarrollado durante la pasantía, la metodología se estructuró en siete etapas principales: (i) recopilación y organización de la información; (ii) preprocesamiento de la información geoespacial; (iii) implementación del modelo hidrológico SWAT+; (iv) procesamiento y corrección de información hidroclimática; (v) actividades de campo para el monitoreo hidrogeológico; (vi) procesamiento, sistematización y análisis de la información; y (vii) integración de los resultados obtenidos para apoyar el desarrollo del proyecto de investigación. Cada una de estas etapas aportó información complementaria para la caracterización hidrológica e hidrogeológica del área de estudio y contribuyó al cumplimiento de los objetivos establecidos para la pasantía.

Figura 1. Metodología empleada en la investigación.



Fuente: elaboración propia, con apoyo de ChatGPT para la estructuración y diagramación.

2.2. Área de estudio

La pasantía se desarrolló en el marco del proyecto "Evaluación del Potencial Hidrogeológico de Zonas Vulnerables de Panamá: Arco Seco (IDDS-040)", cuyo

ámbito de investigación corresponde a las cuencas hidrográficas de los ríos La Villa y Tonosí, localizadas en la península de Azuero, República de Panamá. Estas cuencas forman parte de una de las regiones con mayor vulnerabilidad hídrica del país, caracterizada por presentar un régimen climático con una marcada estacionalidad de las precipitaciones, períodos prolongados de déficit hídrico y una creciente presión sobre los recursos hídricos debido al desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias y al abastecimiento de la población.

La cuenca del río La Villa posee un área aproximada de 126.095,92 ha, subdividida en 23 subcuencas, mientras que la cuenca del río Tonosí comprende aproximadamente 127.137,09 ha, distribuidas en 17 subcuencas. En conjunto, el proyecto contempla el monitoreo de puntos de agua para el seguimiento de los niveles piezométricos y la caracterización hidrogeológica del sistema acuífero. Durante la primera gira de campo se visitaron 21 puntos de agua, correspondientes a 18 pozos y 3 manantiales, incluido un punto de agua termal. De los pozos identificados, 14 fueron considerados viables para el estudio. Como parte de esta primera campaña se instalaron seis leveloggers y dos barologgers en los puntos que presentaron condiciones adecuadas para el monitoreo. Estas actividades fueron realizadas debido a su importancia para el abastecimiento hídrico y a la necesidad de fortalecer el conocimiento sobre la disponibilidad y comportamiento de las aguas subterráneas en las zonas con mayor susceptibilidad a eventos de sequía en Panamá. El inventario detallado de los puntos visitados, así como su clasificación según viabilidad para el estudio, puntos instrumentados y equipos instalados, se presenta en el Anexo I. “Pozos visitados e instrumentados durante la campaña de monitoreo – Gira técnica 31/03/2026 al 01/04/2026”, donde se incluye además la información correspondiente a cada punto de agua

El objeto de estudio estuvo orientado a apoyar la caracterización hidrológica e hidrogeológica de ambas cuencas mediante la integración de información topográfica, climática, hidrométrica, geológica y de campo, permitiendo generar insumos para la implementación de modelos hidrológicos y el análisis del comportamiento del recurso hídrico superficial y subterráneo. En este contexto, la pasantía permitió participar en diferentes fases del proyecto, contribuyendo tanto al procesamiento de información espacial como al levantamiento de información primaria durante las campañas de monitoreo hidrogeológico desarrolladas en la región de Azuero.

Figura 2. Localización del área de estudio.



Fuente: elaboración propia, realizado con QGIS.

2.3. Marco de referencia del área de estudio

2.3.1. Contexto climático

La península de Azuero forma parte de la región conocida como Arco Seco de Panamá, caracterizada por una marcada estacionalidad de las precipitaciones y por un período seco que puede extenderse durante varios meses. De acuerdo con la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM, 2013), en el Arco Seco la estación seca puede alcanzar aproximadamente siete meses consecutivos. La distribución espacial de la precipitación presenta además una variación importante, con mayores valores hacia las zonas montañosas y menores precipitaciones hacia las llanuras próximas a la costa del Pacífico.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta distribución climática es relevante debido a que la precipitación constituye una de las principales fuentes de alimentación de los sistemas de agua subterránea. El estudio regional de ANAM (2013) señala que las zonas de recarga se localizan principalmente en montañas y cerros bajos, donde la infiltración de la precipitación y de parte de la escorrentía superficial contribuye a la alimentación de los sistemas acuíferos. En las zonas de tránsito y descarga, las condiciones topográficas y el comportamiento del nivel freático modifican la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas.

En este contexto, las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí presentan condiciones particularmente relevantes para el estudio del recurso hídrico, debido a la combinación de una marcada estacionalidad climática, períodos de déficit hídrico y una creciente utilización de las aguas subterráneas para actividades domésticas y productivas.

2.3.2. Contexto geológico e hidrogeológico

La configuración geológica del Arco Seco es compleja y comprende unidades de diferentes edades y orígenes, incluyendo depósitos sedimentarios, materiales volcánicos, rocas intrusivas y depósitos aluviales recientes. El estudio de ANAM (2013) identifica, entre otras, las formaciones Ocú, Tonosí, San Pedrito, Galiqué, Pesé, Macaracas, Santiago, Playa Venado, Cañazas y Valle Riquito, además de depósitos aluviales asociados a las formaciones Río Hato y Las Lajas.

Estas unidades presentan diferentes condiciones de permeabilidad y capacidad para almacenar y transmitir agua. De acuerdo con ANAM (2013), los depósitos aluviales recientes pueden presentar materiales como gravas, arenas y conglomerados y, cuando se encuentran saturados, constituyen unidades con condiciones relativamente favorables para el almacenamiento y aprovechamiento de agua subterránea. En contraste, varias de las unidades sedimentarias y volcánicas presentan permeabilidad baja o media, por lo que la circulación del agua puede estar condicionada por fracturas, grietas y zonas de alteración de la roca.

En la cuenca del río La Villa se han desarrollado investigaciones específicas para mejorar el conocimiento de estos sistemas. Castrellón (2016) desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca a partir de información de pozos, niveles de agua subterránea y registros de perforación. El estudio identificó la complejidad geológica de la cuenca y señaló la necesidad de continuar recopilando información para mejorar la comprensión del

comportamiento de las aguas subterráneas y avanzar posteriormente hacia un modelo matemático de flujo.

Posteriormente, Opolenko de Arjona (2021) realizó la identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa mediante la integración de información geológica y prospección geoelectrica. El estudio retomó además los antecedentes del proyecto regional de delimitación de acuíferos desarrollado para ANAM, en el cual se realizaron sondeos eléctricos verticales para investigar la posible presencia de acuíferos profundos.

Estos antecedentes muestran que el potencial hidrogeológico de Azuero no puede analizarse únicamente a partir de la precipitación. La disponibilidad y circulación del agua subterránea dependen también de la distribución de las unidades geológicas, sus propiedades hidráulicas, el grado de fracturamiento, las condiciones de recarga y la relación entre las aguas superficiales y subterráneas.

2.3.3. Antecedentes del Arco Seco y disponibilidad de aguas subterráneas

El estudio de las aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá ha adquirido relevancia debido a la marcada estacionalidad climática de la región, la demanda de agua para actividades agrícolas y el abastecimiento de comunidades durante los periodos de menor precipitación. En este contexto, la caracterización de los sistemas acuíferos requiere integrar información hidrogeológica, piezométrica, hidroquímica e isotópica.

Entre los antecedentes desarrollados para la cuenca del río La Villa se encuentra el trabajo de Castrellón Romero (2016), quien desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca a partir del análisis de niveles de agua subterránea y su relación con la precipitación. El estudio evidenció una respuesta temporal del nivel freático frente a los eventos de precipitación y destacó la necesidad de ampliar el conocimiento sobre la dinámica del agua subterránea en la cuenca.

Posteriormente, Opolenko de Arjona (2021) realizó la identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, contribuyendo al reconocimiento de las condiciones hidrogeológicas y de las unidades con potencial para el almacenamiento y aprovechamiento de agua subterránea.

De manera más reciente, Muñoz, Salceda y Fábrega (2025) desarrollaron un trabajo orientado a la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual para la cuenca del río La Villa, integrando información de hidrología isotópica

y variables hidroquímicas. Este antecedente resulta particularmente relevante para el presente proyecto, debido a que evidencia la necesidad de integrar diferentes líneas de información para interpretar los procesos de recarga, circulación y características del agua subterránea en la cuenca.

Asimismo, los trabajos desarrollados por Atencio (2019) en la cuenca de Parita y por González-González et al. (2023) en la subcuenca del río Zaratí muestran la aplicación de técnicas hidroquímicas, isotópicas y de caracterización del agua subterránea en diferentes sectores del Arco Seco. Estos antecedentes permiten contextualizar las actividades desarrolladas durante la pasantía, particularmente el monitoreo de niveles piezométricos, la instrumentación de pozos, la toma de muestras y la generación de información para el análisis hidrogeológico.

En este sentido, la pasantía se desarrolló como un apoyo a la generación y organización de información hidrogeológica para las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí, mediante actividades de campo, georreferenciación, monitoreo piezométrico, instrumentación y procesamiento de información hidrológica, contribuyendo a las necesidades de caracterización planteadas en investigaciones anteriores.

2.4. Recopilación y organización de la información

La recopilación de la información constituyó la primera etapa metodológica para la implementación del modelo hidrológico y el desarrollo de las actividades hidrogeológicas contempladas en el proyecto. Esta fase tuvo como propósito reunir, verificar y organizar los insumos necesarios para garantizar la consistencia técnica de los análisis posteriores, integrando información espacial, climática, hidrológica e hidrogeológica proveniente de diferentes entidades nacionales e institucionales.

La recopilación de información se desarrolló mediante la consulta y consolidación de bases de datos geográficas, registros hidrometeorológicos, cartografía temática e información generada previamente por el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH). Entre las principales fuentes de información utilizadas se encuentran el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG), el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), el Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA) y la plataforma NASA POWER, las cuales proporcionaron información topográfica, climática, hidrológica y de cobertura del suelo requerida para la implementación del modelo SWAT+.

La información espacial recopilada comprendió modelos digitales de elevación (DEM) con resolución espacial de 5 m, cartografía de uso y cobertura del suelo,

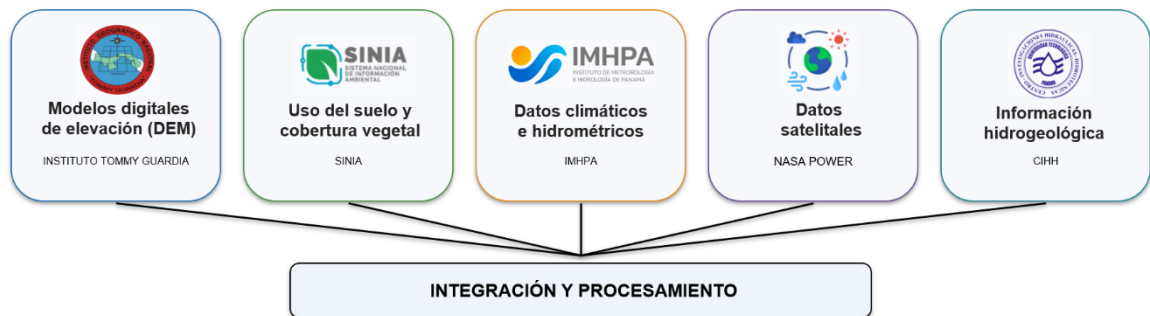
información de tipos de suelo y delimitaciones hidrográficas correspondientes a las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. Estos insumos constituyeron la base para el desarrollo del análisis geoespacial y la posterior definición de las unidades hidrológicas requeridas por el modelo hidrológico. Durante esta etapa también se verificó la compatibilidad de formatos, sistemas de referencia y estructura de los archivos, con el fin de evitar inconsistencias durante el procesamiento en los Sistemas de Información Geográfica.

De manera complementaria, se recopiló información hidroclimática correspondiente a registros históricos de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y caudales observados disponibles para el área de estudio. Debido a la existencia de vacíos de información y diferencias en la cobertura espacial de algunas estaciones meteorológicas, fue necesario complementar los registros observados mediante información satelital obtenida desde la plataforma NASA POWER Downloader integrada en QGIS. Esta estrategia permitió disponer de series climáticas continuas para apoyar la implementación y calibración del modelo hidrológico.

Paralelamente, se recopiló la información asociada al monitoreo hidrogeológico desarrollado por el CIHH, incluyendo la localización de los pozos de observación, inventarios de campo, registros piezométricos, antecedentes de instrumentación y resultados de campañas de monitoreo realizadas en las cuencas objeto de estudio. Esta información permitió comprender las características generales del sistema acuífero y sirvió como soporte para la planificación de las actividades de campo ejecutadas durante la pasantía.

Una vez obtenida la totalidad de los insumos, se realizó un proceso de organización y clasificación de la información mediante una estructura jerárquica de directorios, diferenciando la información raster, vectorial, climática, hidrológica, hidrogeológica y documental. Esta organización permitió optimizar el flujo de trabajo durante las etapas posteriores de procesamiento geoespacial, configuración del modelo SWAT+, calibración y análisis de resultados, reduciendo la posibilidad de inconsistencias asociadas al manejo de grandes volúmenes de información.

Figura 3. Fuentes de información utilizadas durante la pasantía.



Fuente: elaboración propia

2.5. Reconocimiento y construcción del modelo hidrogeológico conceptual.

La interpretación hidrogeológica conceptual se desarrolló a partir de la integración de la información disponible sobre los puntos de monitoreo, las mediciones de niveles piezométricos, la localización y características de los pozos, los registros obtenidos mediante los transductores de presión y las observaciones realizadas durante las actividades de campo. Como información complementaria se consideraron los antecedentes hidrogeológicos recopilados por el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) y el reconocimiento de las condiciones hidráulicas observadas en los sitios visitados.

Durante la campaña de campo se realizaron mediciones manuales de los niveles piezométricos con el propósito de verificar el funcionamiento de los sensores instalados y disponer de registros de control. También se documentaron las condiciones de los pozos, su infraestructura, estado de conservación y las características generales de los sitios de monitoreo.

Como parte del reconocimiento hidrogeológico se inspeccionó un afloramiento termal localizado en la región de estudio. Esta observación se consideró como evidencia cualitativa para la interpretación del sistema de circulación del agua subterránea, debido a que constituye una manifestación superficial asociada a condiciones particulares de circulación y descarga.

Con base en esta información se estableció una interpretación conceptual preliminar del sistema hidrogeológico, considerando como elementos principales las zonas potenciales de recarga, la circulación del agua subterránea, los puntos de aprovechamiento y monitoreo mediante pozos y las posibles zonas de descarga. Esta interpretación se utilizó como apoyo para comprender la relación entre las condiciones superficiales, la dinámica piezométrica observada y las actividades de monitoreo desarrolladas durante la pasantía.

Debido al alcance de las actividades realizadas y a la disponibilidad de información, esta interpretación se considera de carácter conceptual y cualitativo. No se plantea como un modelo numérico de flujo subterráneo ni como una representación tridimensional definitiva del sistema acuífero.

2.6. Preprocesamiento de la información geoespacial

Una vez consolidada la información de entrada, se realizó el preprocesamiento geoespacial de los insumos requeridos para la implementación del modelo SWAT+. El procesamiento se desarrolló mediante QGIS, ArcGIS Pro, QSWAT+ y MapSWAT+, adoptando el sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 17N para las capas utilizadas.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE), suministrados por el Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”, fueron integrados a partir de varios mosaicos y procesados para obtener una cobertura continua de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. Posteriormente, mediante QSWAT+, se realizó la delimitación de las cuencas, la definición de la red de drenaje y la generación de las subcuencas, utilizando los parámetros de acumulación de flujo establecidos para el modelo.

Para la generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) y la delimitación de la red de drenaje mediante QSWAT+, se establecieron criterios de procesamiento orientados a controlar el nivel de detalle espacial del modelo y evitar la generación de unidades con representatividad reducida. Estos criterios incluyeron los umbrales mínimos de representación para las capas de uso y cobertura del suelo, tipos de suelo y pendiente, las clases de pendiente empleadas y el umbral de acumulación de flujo utilizado para la definición de la red de drenaje y las subcuencas. Los parámetros utilizados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios empleados para la generación de HRUs y delimitación de la red de drenaje

Componente	Criterio utilizado	Valor / clasificación	Fuente
HRU	Criterio de generación	Target number of HRUs	Configuración QSWAT+
Número de HRU	Cantidad objetivo/configurada	1.000 HRU	QSWAT+ / SWAT+ Check
LSU	Unidades de paisaje	452 LSU	SWAT+ Check
Subcuencas	Delimitación	23 subcuencas	QSWAT+ / SWAT+ Check
Red de drenaje	Channel threshold	153.328 celdas = 3,833 km ²	Configuración QSWAT+
Red de drenaje	Stream threshold	1.533.276 celdas = 38,33 km ²	Configuración QSWAT+
Snap threshold	Distancia de ajuste	300 m	Configuración QSWAT+

Fuente: elaboración propia

Como resultado del procesamiento se obtuvieron los insumos geoespaciales utilizados posteriormente en la configuración del modelo SWAT+, incluyendo el MDE procesado, las subcuencas, la red de drenaje y las capas requeridas para la generación de las HRU.

2.7. Construcción y configuración del modelo hidrológico SWAT+

La construcción y configuración del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool Plus (SWAT+) se realizó a partir de los insumos geoespaciales previamente procesados y de la información hidroclimática disponible para las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. La configuración se desarrolló mediante QSWAT+ y SWAT Editor, incorporando la estructura espacial, los datos meteorológicos y los parámetros requeridos para la simulación hidrológica.

A partir de la estructura espacial obtenida mediante QSWAT+, se incorporaron al modelo las subcuencas, la red de drenaje y las HRU generadas durante el procesamiento geoespacial. Posteriormente se realizó la incorporación y organización de la información meteorológica y la configuración de los parámetros necesarios para ejecutar las simulaciones.

Una vez estructurado el componente espacial del modelo, se procedió a la parametrización mediante SWAT Editor, incorporando la información meteorológica

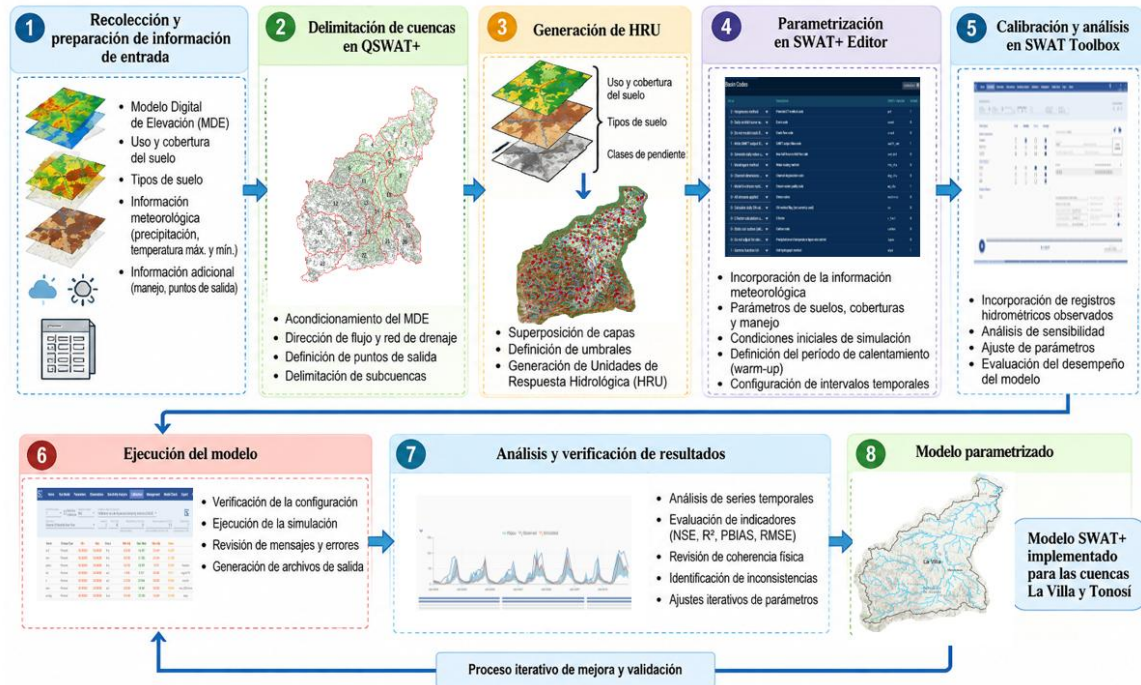
correspondiente a precipitación, temperatura máxima y mínima, así como los parámetros físicos asociados a las características de los suelos, coberturas vegetales y manejo de las cuencas. Durante esta etapa también se definieron las condiciones iniciales de simulación, el período de calentamiento (*warm-up period*) y los intervalos temporales requeridos para la ejecución del modelo.

Posteriormente, el modelo fue preparado para su calibración mediante SWAT Toolbox, herramienta que permitió incorporar los registros hidrométricos observados, realizar el análisis de sensibilidad de parámetros y evaluar el desempeño del modelo mediante indicadores estadísticos. Esta etapa permitió identificar los parámetros con mayor influencia sobre la respuesta hidrológica y establecer los ajustes requeridos durante la calibración.

La calibración hidrológica se realizó para la cuenca del río La Villa utilizando los registros de caudal de la estación hidrológica Río La Villa–Atalayita. El procesamiento se realizó a escala mensual, empleando el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) como función objetivo y el algoritmo Latin Hypercube Sampling (LHS) para la exploración de los rangos de los parámetros sensibles. Los parámetros ajustados correspondieron a CN2, OVN, PETCO, BD, K, AWC y SURLAG. Como resultado del proceso de calibración se obtuvo un NSE de 0,712. La validación independiente no se realizó durante la pasantía; para la cuenca del río Tonosí tampoco fue posible efectuar calibración ni validación debido a la falta de registros hidrométricos de caudal disponibles durante el período de estudio.

Como resultado de esta etapa se obtuvo la estructura de modelación SWAT+ para las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí, con la información espacial y meteorológica incorporada y los parámetros necesarios para continuar con las etapas de simulación, análisis de sensibilidad y calibración.

Figura 4. Flujo metodológico para la implementación del modelo hidrológico SWAT+



Fuente: elaboración propia, con apoyo de ChatGPT para la estructuración y diagramación.

2.8. Procesamiento y corrección de información hidroclimática

Inicialmente, se recopiló la información meteorológica observada suministrada por el Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA), correspondiente a registros históricos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima disponibles para las estaciones localizadas dentro y en el área de influencia de las cuencas de estudio. La identificación de las estaciones meteorológicas utilizadas, junto con su código, localización y periodo de registro, se presenta en la Tabla X.

Debido a la presencia de discontinuidades temporales y a la limitada cobertura espacial de algunas estaciones meteorológicas, se complementaron los registros observados mediante información obtenida de la plataforma NASA POWER Downloader, integrada al software QGIS. Para las variables meteorológicas empleadas en este estudio, NASA POWER utiliza productos derivados principalmente del sistema de reanálisis MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2). Por tanto, estos datos no

corresponden exclusivamente a observaciones satelitales, sino a productos meteorológicos derivados de sistemas de modelación y asimilación de datos.

Los productos meteorológicos de NASA POWER presentan una resolución espacial de $0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$, equivalente aproximadamente a una escala del orden de 50 km. En consecuencia, los valores descargados representan las condiciones correspondientes a la celda espacial del producto y no una medición puntual realizada directamente en una estación meteorológica.

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron registros de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, los cuales fueron organizados y estructurados de acuerdo con los requerimientos de entrada del modelo SWAT+. La información de NASA POWER se empleó como complemento de los registros observados del IMHPA, principalmente para cubrir discontinuidades y ampliar la disponibilidad espacial de información hidroclimática.

Para el período requerido de modelación, comprendido entre 2002 y 2011, se utilizaron las series de NASA POWER como fuente complementaria. La comparación con los registros observados del IMHPA se realizó durante el período de referencia disponible, correspondiente a 2010–2015, que permitió establecer las funciones de corrección mediante Quantile Mapping.

Tabla 2. Esquema temporal del procesamiento de datos meteorológicos y aplicación del Quantile Mapping

Etapa	Período	Función
Datos observados	2010–2015	Período de referencia para caracterizar la precipitación observada
NASA POWER descargado	2002–2015	Serie meteorológica utilizada como fuente complementaria
Calibración del Quantile Mapping	2010–2015	Construcción de la función de corrección para cada estación
Aplicación retrospectiva del QM	2002–2011	Corrección de la serie requerida por SWAT+
Período de modelación SWAT+	2002–2011	Simulación hidrológica de La Villa

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Implementación del Nasa Power Downloader para descarga de data satelital.

Fuente: QGIS procesamiento.

La información descargada desde NASA POWER fue organizada y estructurada de acuerdo con los requerimientos del modelo SWAT+, verificando la consistencia de formatos, unidades de medida y períodos de registro. Posteriormente, se desarrolló utilizando como período de referencia y calibración el intervalo comprendido entre 2010 y 2015, con el fin de identificar las diferencias estadísticas existentes entre ambas fuentes de información y establecer la necesidad de aplicar un procedimiento de corrección de sesgos antes de su utilización en la modelación hidrológica.

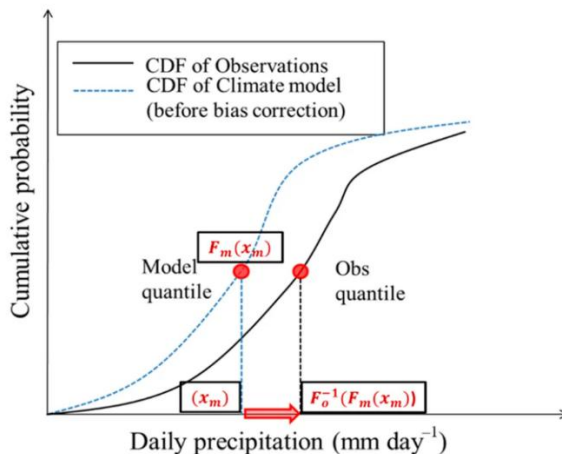
Tabla 3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el procesamiento hidroclimático y descarga de información en el NASA POWER.

ID	NAME	LAT	LONG	ELEVATION
1	llanopcp	7.956	-80.640	60
2	pesepcp	7.900	-80.616	80
3	valrpcp	7.623	-80.353	173

Fuente: elaboración propia

La corrección de sesgos se realizó mediante la técnica estadística *Quantile Mapping* (QM), una metodología ampliamente utilizada en hidrología y climatología para ajustar la distribución de probabilidad de datos simulados o satelitales a partir de registros observados. Esta técnica consiste en transformar la distribución estadística de una serie de datos modelados o estimados para que reproduzca el comportamiento de la distribución observada, reduciendo las diferencias sistemáticas entre ambas fuentes de información. Diversas investigaciones han demostrado que Quantile Mapping constituye uno de los métodos más robustos y ampliamente aceptados para la corrección de sesgos en variables hidroclimáticas, debido a su capacidad para preservar la variabilidad temporal de las series y mejorar la representación de eventos extremos, aspectos fundamentales para incrementar la confiabilidad de los modelos hidrológicos (Thiemeßl et al., 2012, Cannon et al., 2015).

Figura 6. Representación esquemática del método de corrección de sesgo mediante Quantile Mapping.



Fuente: Abdolmanafi et al. (2021), adaptado de Kim et al. (2016).

En el presente estudio, la aplicación de Quantile Mapping se desarrolló utilizando como período de calibración el intervalo comprendido entre 2002 y 2011, durante el cual se disponía simultáneamente de registros observados y datos satelitales de precipitación obtenidos mediante la plataforma NASA POWER. A partir de este período común se determinaron las funciones de corrección para cada estación meteorológica, las cuales fueron posteriormente aplicadas a las series satelitales con el propósito de obtener registros corregidos y estadísticamente consistentes con las condiciones climáticas observadas en las cuencas de estudio.

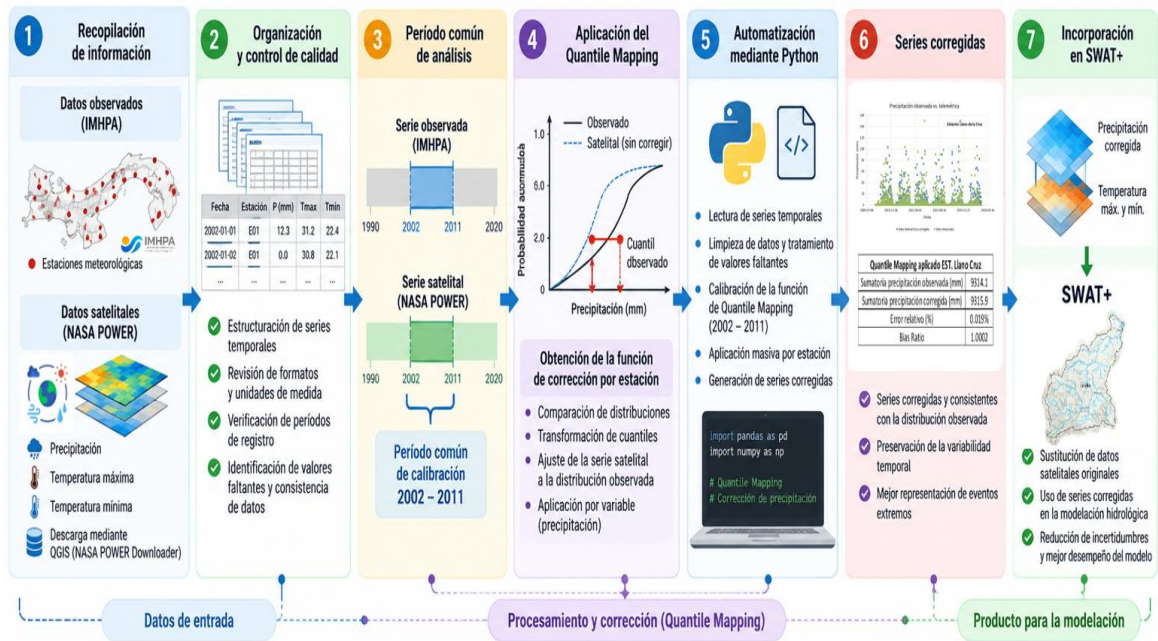
La implementación del procedimiento de corrección se realizó mediante el desarrollo y adaptación de scripts en lenguaje Python, los cuales automatizaron el procesamiento masivo de la información correspondiente a las diferentes estaciones meteorológicas consideradas dentro del estudio. Este proceso incluyó la lectura de las series temporales, la calibración de las funciones de corrección durante el período de referencia, la aplicación de dichas funciones sobre la información satelital y la generación de nuevas series corregidas listas para ser incorporadas al modelo SWAT+. La automatización del procedimiento permitió optimizar significativamente los tiempos de procesamiento, disminuir errores asociados al tratamiento manual de la información y garantizar la reproducibilidad de la metodología aplicada.

Una vez obtenidas las series corregidas mediante Quantile Mapping, estas fueron organizadas y preparadas como información de entrada para el modelo hidrológico SWAT+. La aplicación del procedimiento permitió generar series de precipitación estadísticamente ajustadas respecto observados utilizados durante el período de calibración 2010–2015. La evaluación presentada en esta etapa se concentró en la consistencia estadística de las series de precipitación corregidas, por lo que los resultados del desempeño hidrológico del modelo se analizaron posteriormente durante las etapas de calibración y validación. En este sentido, la aplicación de Quantile Mapping permitió obtener una fuente de información hidroclimática complementaria y corregida, reduciendo los sesgos estadísticos identificados entre los datos de NASA POWER y los registros observados. Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura científica, donde se señala que la calidad de los datos de entrada constituye uno de los factores con mayor influencia sobre la capacidad predictiva de modelos hidrológicos físicamente basados como SWAT+ (Arnold et al., 2012; Bieger et al., 2017).

Desde el punto de vista metodológico, esta etapa representó uno de los principales aportes técnicos desarrollados durante la pasantía, debido a que permitió integrar técnicas modernas de procesamiento estadístico, programación y análisis hidroclimático para mejorar la calidad de los datos utilizados en la modelación hidrológica. Asimismo, evidenció la importancia de realizar procesos rigurosos de control de calidad y corrección de información antes de ejecutar modelos numéricos, especialmente en regiones donde la disponibilidad de información observada es limitada o presenta vacíos temporales significativos.

Como producto de esta fase se obtuvo un conjunto de series hidroclimáticas depuradas y corregidas, compatibles con los requerimientos del modelo SWAT+, las cuales constituyeron la base para las etapas posteriores de calibración, validación y análisis hidrológico desarrolladas dentro del proyecto de investigación

Figura 7. Flujo metodológico para la corrección de datos mediante Quantile Mapping.



Fuente: elaboración propia, con apoyo de ChatGPT para la estructuración y diagramación.

2.9. Actividades de campo para el monitoreo hidrogeológico

Como parte del desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo actividades de campo orientadas al monitoreo hidrogeológico de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí, ubicadas en la península de Azuero. Estas actividades tuvieron como finalidad obtener información primaria sobre el comportamiento del agua subterránea, fortalecer la red de monitoreo existente y generar insumos para la caracterización hidrogeológica del área de estudio. La campaña de campo se desarrolló entre el 30 de marzo y el 1 de abril de 2026, bajo la coordinación del tutor de la pasantía, el Ph. D. Ing. Miguel Salceda, designado por el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá.

2.9.1. Protocolo de muestreo de agua subterránea

El procedimiento de muestreo se desarrolló mediante una secuencia de actividades en campo, orientada a la obtención de muestras de agua subterránea para el análisis de nitratos y ortofosfatos, así como al registro de parámetros fisicoquímicos *in situ*.

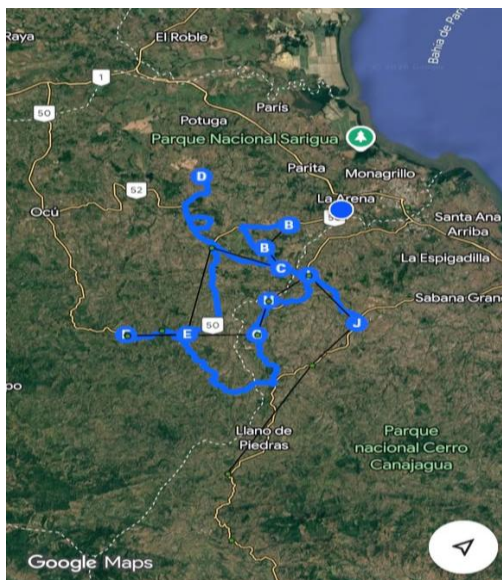
- I. Verificación y preparación del punto de muestreo: Se realizó la identificación del pozo seleccionado y la verificación de las condiciones de acceso y operación. Antes de iniciar el muestreo se dispuso el equipo requerido, incluyendo bomba de succión, batería eléctrica, variador de velocidad, recipientes de muestreo, filtros, cinta métrica y equipos de medición. La bitácora registra que en algunos puntos no fue posible obtener muestras debido a las condiciones del pozo o a inconvenientes con el equipo de succión.
- II. Medición de parámetros fisicoquímicos *in situ*: Se realizaron mediciones directamente en campo mediante un multiparámetro portátil. La bitácora registra la medición de los parámetros fisicoquímicos en diferentes puntos de las provincias de Herrera y Los Santos, como parte de la caracterización de las condiciones del agua durante la visita.
- III. Extracción del agua: Cuando las condiciones del punto lo permitieron, se utilizó una bomba de succión para extraer el agua del pozo.
- IV. Recolección de la muestra: El agua extraída se recolectó en recipientes destinados para el muestreo. En el *anexo I*, se registra específicamente la obtención de muestras en determinados pozos, incluyendo puntos donde además se realizó la instalación de transductores de presión.
- V. Filtrado de la muestra: Las muestras fueron acondicionadas mediante filtros de jeringa antes de su almacenamiento y posterior análisis. Este procedimiento se encuentra asociado en los registros de campo con el uso de recipientes y filtros durante las actividades de muestreo.
- VI. Identificación y preservación: Una vez recolectadas, las muestras fueron identificadas y manejadas de acuerdo con las actividades previstas de preservación y cadena de custodia, se transportó en un cooler manteniendo las condiciones de refrigeración.

VII. Transporte y análisis: Las muestras fueron obtenidas para posteriormente al análisis de nitratos (NO_3^-) y ortofosfatos (PO_4^{3-}) mediante procedimientos de laboratorio basados en colorimetría. Para la vigencia de la pasantía no fue posible realizar los laboratorios de las muestras debido a...

VIII. Registro de la actividad: Finalmente, las actividades realizadas, los equipos utilizados y las condiciones encontradas en cada punto fueron consignados en la bitácora de campo - *Anexo C. Bitácora de campo*. Esto permitió diferenciar los sitios donde fue posible realizar el muestreo de aquellos en los que no se pudo obtener una muestra.

Las actividades iniciaron con el reconocimiento de los sitios de monitoreo y la verificación del estado de los pozos previamente seleccionados para la instrumentación. Esta etapa permitió corroborar las condiciones de acceso, identificar las características físicas de cada punto de monitoreo y establecer la logística necesaria para la ejecución de las actividades programadas. Adicionalmente, se verificó la ubicación geográfica de los pozos y se registró información de campo mediante formatos de inspección y registro fotográfico, garantizando la trazabilidad de la información recopilada.

Figura 8. Trayectoria de la exploración – pozos inspeccionados región de Azuero.



Fuente: Google Maps

Posteriormente, se realizó la instalación y configuración de transductores de presión destinados al monitoreo continuo de los niveles piezométricos. La instrumentación consistió en la instalación de sensores automáticos programados para registrar variaciones del nivel del agua subterránea a intervalos regulares, permitiendo obtener información de alta resolución temporal sobre la dinámica de los acuíferos. Durante esta actividad también se efectuó la instalación de dos sensores barométricos, indispensable para realizar posteriormente la compensación de la presión atmosférica registrada por los sensores y obtener valores reales del nivel freático.

Fotografía 1. Instalación de transductores de presión.



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Gira técnica Región de Azuero

Fotografía 2. Configuración de los transductores de presión.



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Gira técnica Región de Azuero

Como complemento al monitoreo piezométrico, se efectuó la medición in situ de parámetros fisicoquímicos del agua utilizando equipos multiparamétricos portátiles. Estas mediciones permitieron registrar variables de calidad del agua en el momento del muestreo, proporcionando información preliminar sobre las condiciones hidroquímicas presentes en los diferentes puntos de monitoreo. Paralelamente, se realizó la extracción de muestras de agua subterránea mediante una bomba de velocidad variable, procurando mantener condiciones controladas de extracción.

Fotografía 3. Medición manual de niveles piezométricos.



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Gira técnica Región de Azuero

Fotografía 4. Toma y preservación de muestras de agua subterránea.



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Gira técnica Región de Azuero

Durante la campaña también se realizaron mediciones manuales de los niveles piezométricos con el propósito de verificar el funcionamiento de los sensores instalados y disponer de registros de control para la validación de la información obtenida mediante el monitoreo automático. Asimismo, se documentaron las condiciones hidráulicas observadas en cada sitio de monitoreo, incluyendo aspectos relacionados con la infraestructura de los pozos, condiciones de acceso, estado de conservación y posibles factores que pudieran afectar la calidad de las mediciones.

Como parte de las actividades complementarias de reconocimiento hidrogeológico, se efectuó la inspección de un afloramiento termal de agua caliente localizado en la región de estudio, con el objetivo de identificar evidencias de circulación profunda del agua subterránea y comprender mejor las condiciones hidrogeológicas presentes en el sistema acuífero. Este reconocimiento permitió ampliar el conocimiento sobre la dinámica hidrogeológica regional y aportó información cualitativa de interés para la interpretación conceptual del funcionamiento del acuífero.

Fotografía 5. Reconocimiento del afloramiento termal.



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Gira técnica Región de Azuero

Las actividades de campo desarrolladas durante la pasantía permitieron fortalecer la red de monitoreo hidrogeológico del proyecto, generar información primaria para la caracterización del sistema acuífero y adquirir experiencia en procedimientos de instrumentación, monitoreo piezométrico, muestreo de aguas subterráneas y evaluación de parámetros hidroquímicos. La integración de esta información con los análisis geospaciales y la modelación hidrológica desarrollados en gabinete contribuyó a una comprensión más integral del comportamiento hidrológico e hidrogeológico de las cuencas estudiadas.

2.10. Materiales y equipos utilizados

Con el propósito de facilitar la reproducibilidad de la metodología, se presentan los principales equipos empleados durante la campaña de monitoreo.

Tabla 4. Equipos utilizados durante las actividades de campo.

Equipo / herramienta	Marca	Modelo / referencia	Resolución	Precisión	Cantidad	Aplicación
Levellogger	Solinst	Modelo 3001	0,002– 0,0006 % FS*	±0,05 % FS*	6	Monitoreo continuo de niveles piezométricos
Barologger	Solinst	Modelo 3001*	No disponible	No disponible	2	Registro de presión atmosférica para compensación barométrica
Bomba de muestreo de bajo flujo	Proactive Environmental Products	Monsoon XL	No disponible	No disponible	1	Extracción de muestras de agua subterránea mediante muestreo de bajo flujo
Controlador de bomba de bajo flujo	Proactive Environmental Products	Low Flow with Power Booster 2 LCD XL – PA-10670	No disponible	No disponible	1	Regulación y control del caudal durante el muestreo
Batería marina de ciclo profundo	EVEREADY	Marine – 30 Ah	No aplica	No aplica	1	Alimentación eléctrica del sistema de bombeo
Sonda para medición de nivel	Proactive Environmental Products	No identificado	No disponible	No disponible	1	Medición manual del nivel del agua en los pozos
Multiparámetro portátil	No identificada	No identificado	No disponible	No disponible	1	Medición de parámetros fisicoquímicos in situ
Cinta métrica	No identificada	No identificado	No aplica	No disponible	1	Medición manual de niveles
GPS	No identificada	No identificado	No disponible	No disponible	1	Georreferenciación de los puntos de monitoreo
Computador portátil	Dell	No identificado	No aplica	No aplica	1	Configuración y descarga de datos de los Levelloggers
Filtros de jeringa	Labfil	Filtro de membrana, no estéril	No disponible	No disponible	No registrada	Filtración de muestras líquidas de pequeño volumen
Recipientes de muestreo	No identificada	No identificado	No aplica	No aplica	Según muestreo	Recolección y almacenamiento de muestras de agua

2.11. Organización, sistematización y análisis de la información

Una vez finalizadas las etapas de recopilación de información, preprocesamiento geoespacial, implementación del modelo hidrológico, procesamiento de la información hidroclimática y ejecución de las campañas de monitoreo hidrogeológico, se desarrolló la fase de procesamiento, sistematización y análisis de la información. Esta etapa tuvo como propósito integrar los diferentes conjuntos de datos generados durante la pasantía, garantizando la consistencia de la información utilizada en la evaluación hidrológica e hidrogeológica de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí.

El procesamiento de la información comprendió la verificación de la calidad de los datos obtenidos tanto en gabinete como en campo, mediante la revisión de formatos, unidades de medida, consistencia espacial, integridad de los registros y correspondencia temporal entre las diferentes bases de datos. Este procedimiento permitió identificar posibles inconsistencias, registros atípicos o información incompleta que pudiera afectar el desempeño del modelo hidrológico o la interpretación de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

Posteriormente, toda la información fue organizada en una estructura de trabajo jerárquica que permitió integrar bases de datos espaciales, series temporales meteorológicas, registros hidrométricos, información piezométrica, cartografía temática y resultados derivados de la modelación hidrológica. Esta organización facilitó la trazabilidad de los datos y optimizó el intercambio de información entre las diferentes herramientas computacionales utilizadas durante la investigación, reduciendo la posibilidad de errores asociados al manejo de grandes volúmenes de información.

El análisis de la información se desarrolló de manera integrada, relacionando los productos obtenidos mediante el procesamiento geoespacial, la modelación hidrológica y el monitoreo hidrogeológico. Esta integración permitió evaluar el comportamiento hidrológico de las cuencas, interpretar la respuesta del modelo frente a las condiciones climáticas observadas y analizar la influencia de la calidad de los datos de entrada sobre el desempeño de las simulaciones. Asimismo, la información obtenida durante las campañas de campo permitió complementar la interpretación de los resultados mediante la incorporación de observaciones directas sobre las condiciones de los acuíferos y el comportamiento de los niveles piezométricos registrados en los pozos monitoreados.

2.12. Elaboración y presentación del informe técnico.

Como etapa final de la pasantía se realizó la organización y sistematización de la información generada durante las actividades de campo, gabinete y modelación. A partir de los registros de campo, bases de datos, productos cartográficos, resultados de la modelación hidrológica y demás evidencias generadas durante la estancia, se estructuró el informe técnico de pasantía.

La elaboración del informe comprendió la integración de la metodología aplicada, los resultados obtenidos, el análisis de la información, las limitaciones identificadas y los principales aprendizajes derivados de la experiencia. De manera complementaria, se seleccionaron y organizaron los resultados más representativos para preparar la presentación final del trabajo.

La presentación se estructuró a partir del contexto del proyecto IDDS-040, las actividades desarrolladas, los principales resultados obtenidos y los aportes realizados durante la pasantía, haciendo énfasis en las actividades de monitoreo hidrogeológico, instrumentación de pozos, procesamiento de información geoespacial y modelación hidrológica mediante SWAT+.

Finalmente, se realizó la presentación y sustentación del trabajo ante integrantes del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá. Esta actividad se desarrolló como espacio de socialización de los resultados y aprendizajes obtenidos durante la experiencia.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Procesamiento de la información geoespacial

El procesamiento de la información geoespacial constituyó la base para la implementación del modelo hidrológico SWAT+ y para el desarrollo de los análisis hidrogeológicos realizados en las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. Como resultado de esta etapa, se consolidó una base de datos espacial estructurada y estandarizada que integró información topográfica, hidrológica, climática y de cobertura del suelo, permitiendo disponer de insumos confiables para la modelación hidrológica y el análisis espacial del área de estudio.

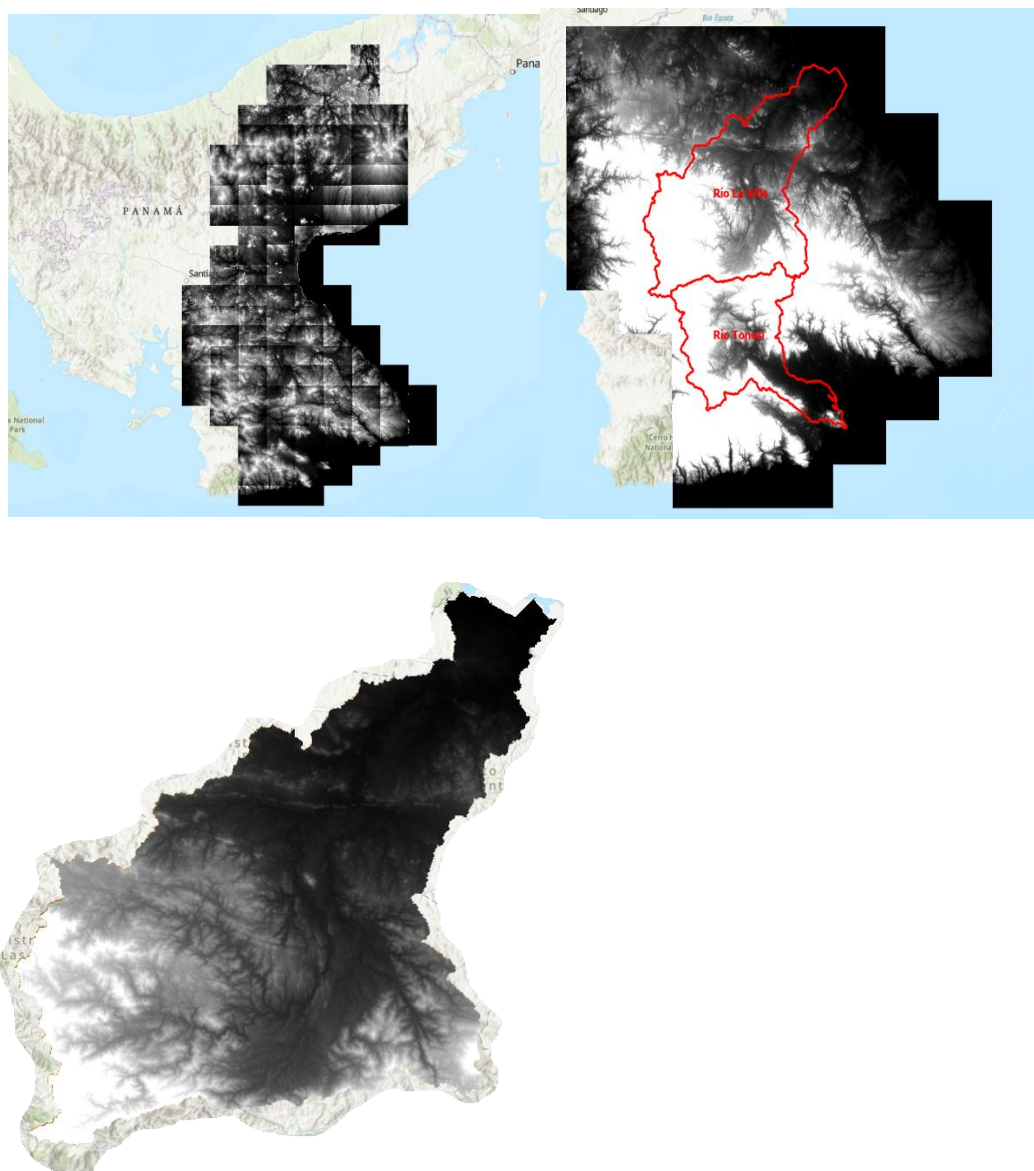
La organización de la información geográfica permitió unificar la totalidad de los insumos cartográficos bajo un mismo sistema de referencia espacial (WGS 84 / UTM Zona 17N), garantizando la compatibilidad entre las diferentes capas temáticas y reduciendo inconsistencias derivadas del manejo de información proveniente de diversas fuentes oficiales. Este proceso facilitó la interoperabilidad entre los diferentes programas utilizados durante la investigación, particularmente QGIS, ArcGIS Pro y QSWAT+, optimizando el flujo de trabajo y asegurando la consistencia espacial de los datos empleados durante la implementación del modelo.

Uno de los principales resultados obtenidos fue la generación del Modelo Digital de Elevación (MDE) corregido y preparado para el análisis hidrológico, el cual permitió representar adecuadamente la morfología del terreno y constituyó el insumo fundamental para la delimitación automática de las cuencas hidrográficas y la extracción de la red de drenaje. La correcta preparación del MDE permitió minimizar errores asociados a depresiones artificiales y discontinuidades topográficas, favoreciendo una representación más realista de la dirección y acumulación del flujo superficial. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Arnold et al. (2012), quienes señalan que la calidad del modelo digital del terreno influye directamente en la precisión de la delimitación hidrológica y, por consiguiente, en el desempeño de los modelos hidrológicos distribuidos.

A partir del procesamiento del MDE se obtuvo la delimitación definitiva de las cuencas hidrográficas de los ríos La Villa y Tonosí, así como la definición de la red de drenaje y de las subcuencas que conforman el modelo hidrológico. La delimitación automática permitió representar de manera consistente la estructura del sistema de drenaje, identificando las áreas de aporte que posteriormente

sirvieron como unidades básicas para la simulación hidrológica. La obtención de estos productos constituye un resultado fundamental, ya que define la organización espacial sobre la cual se desarrollan los procesos de escorrentía, infiltración y transporte de agua simulados por SWAT+.

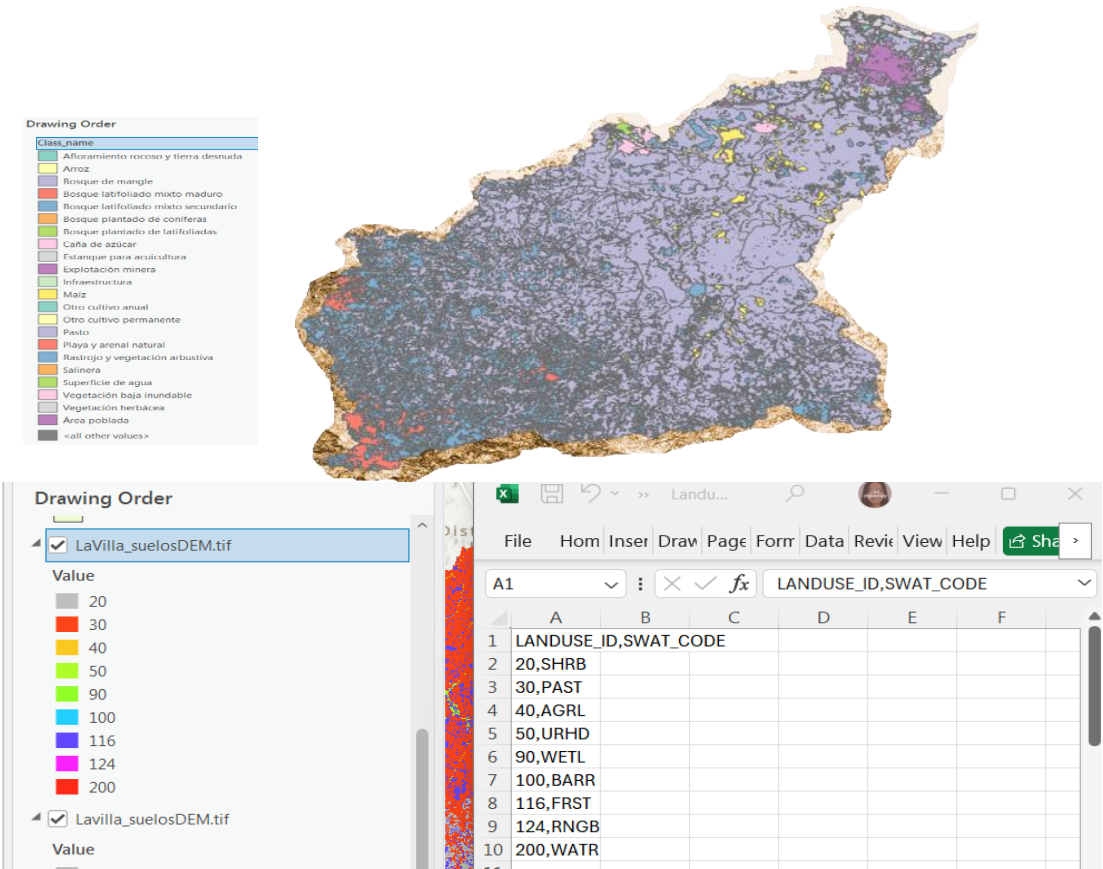
Figura 9. Modelo Digital de Elevación (MDE) procesado de las cuencas La Villa y Tonosí.



Fuente: Procesamiento cartografía en ArcGIS PRO

De igual manera, la integración de la información correspondiente al uso y cobertura del suelo, tipos de suelo y pendiente permitió generar las Unidades de Respuesta Hidrológica (Hydrologic Response Units, HRUs), las cuales representan áreas homogéneas desde el punto de vista hidrológico. La generación de las HRUs permitió caracterizar espacialmente la variabilidad existente dentro de cada subcuenca y representar con mayor precisión los procesos hidrológicos asociados a las características físicas del territorio. Este resultado adquiere especial relevancia debido a que la correcta definición de las HRUs mejora la capacidad del modelo para representar las diferencias en infiltración, evapotranspiración, generación de escorrentía y producción de sedimentos, tal como ha sido ampliamente documentado en la literatura especializada (Bieger et al., 2017).

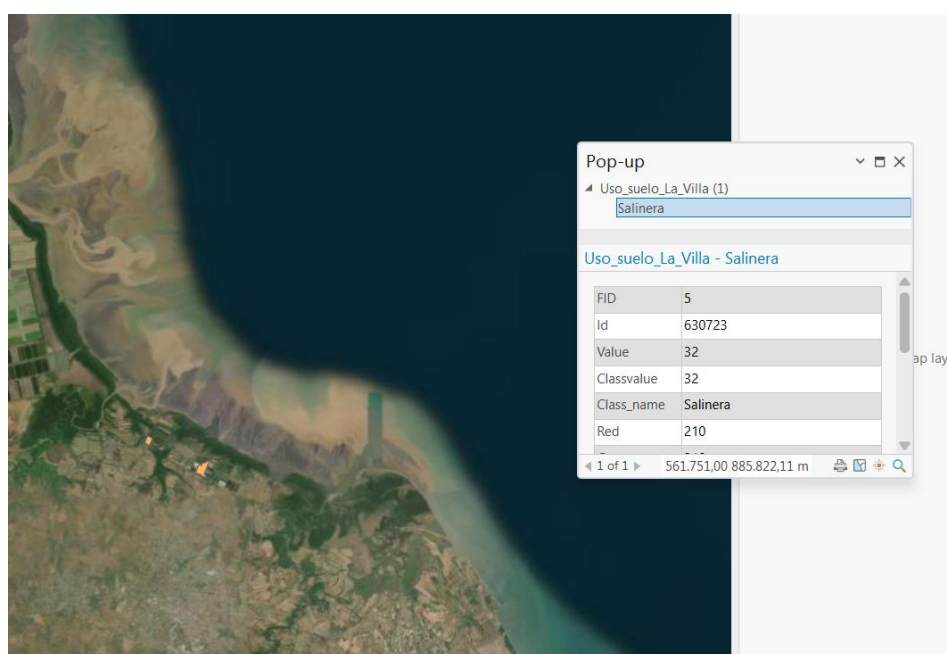
Figura 10. Mapa de uso y cobertura del suelo.



Fuente: Procesamiento cartografía en ArcGIS PRO

Como parte del control de calidad de la información geográfica, se efectuó la validación visual de la cartografía mediante imágenes satelitales de alta resolución disponibles en Google Earth Engine, permitiendo verificar la correspondencia entre las coberturas del suelo, la red hidrográfica y las condiciones observadas en el terreno. Este proceso permitió identificar y corregir inconsistencias cartográficas, mejorando la representatividad espacial de la información utilizada en el modelo y reduciendo posibles fuentes de incertidumbre asociadas a errores de clasificación.

Figura 11. Validación visual de cartografía mediante imágenes satelitales.

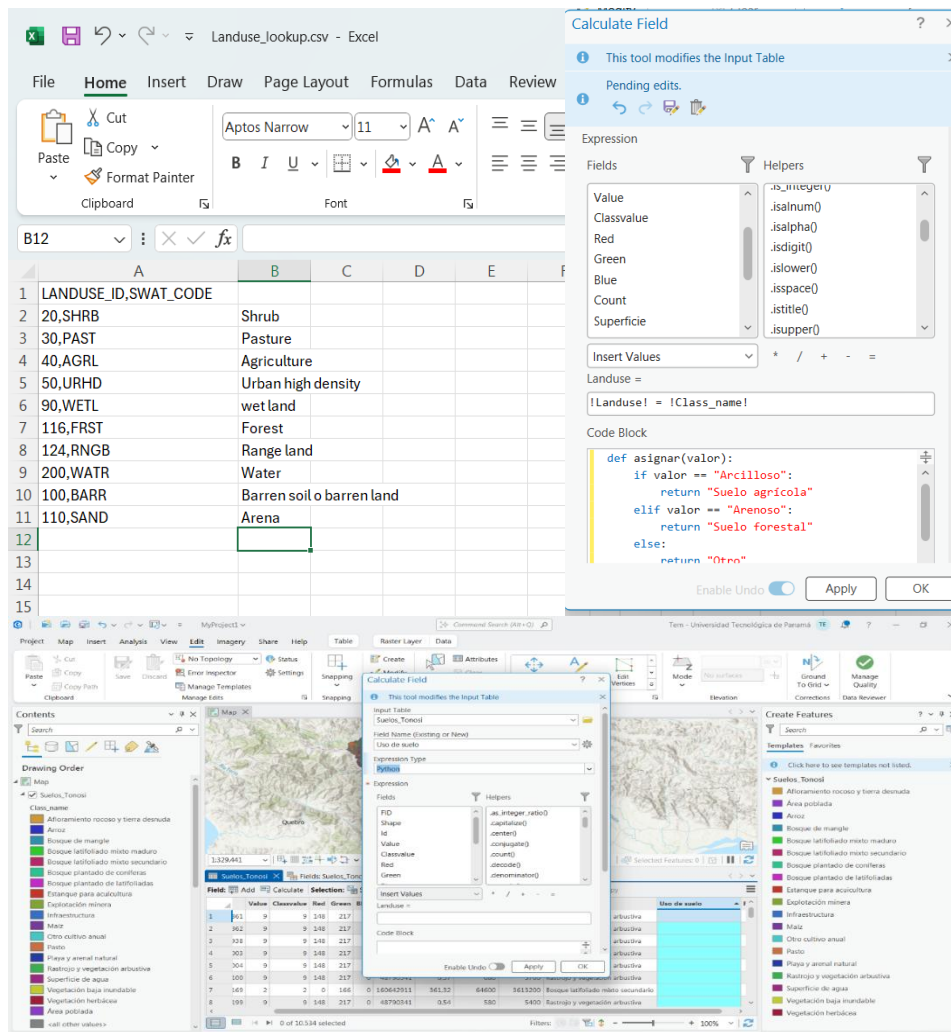


Fuente: Mapas satelitales disponibles en ArcGIS PRO

Para la definición del uso y cobertura del suelo requerido por el modelo SWAT+, se utilizó inicialmente la información cartográfica disponible en el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), la cual fue incorporada al entorno de procesamiento mediante MapSWAT. Posteriormente, las diferentes clases de cobertura fueron revisadas y contrastadas mediante imágenes satelitales procesadas en Google Earth Engine, con el propósito de verificar que la clasificación representara de manera adecuada las condiciones existentes en las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. A partir de esta revisión, se realizó la reasignación y codificación de las clases de cobertura de acuerdo con la

nomenclatura requerida por SWAT, tomando como referencia el manual de códigos de uso y cobertura del suelo del modelo. Finalmente, la información reclasificada fue cruzada nuevamente con la cartografía disponible en el SINIA para verificar la correspondencia entre las clases originales y los códigos asignados, obteniendo una capa de uso y cobertura compatible con SWAT+ para su posterior integración con los tipos de suelo y las clases de pendiente en la generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs).

Figura 12. Reclasificación de usos de suelo al SWAT Code.

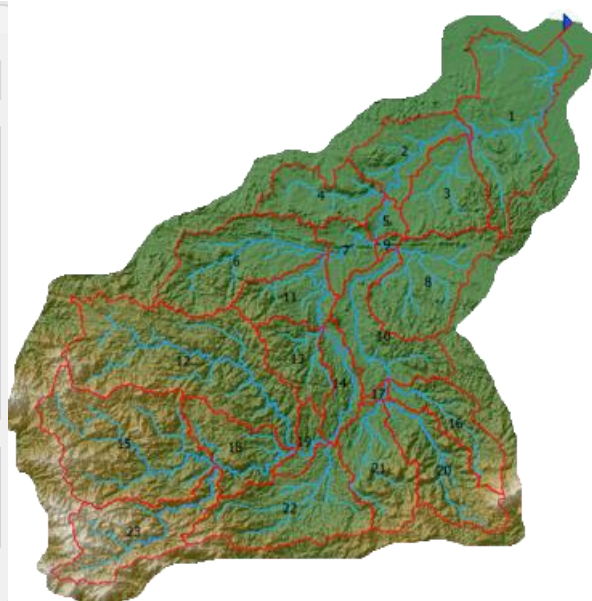
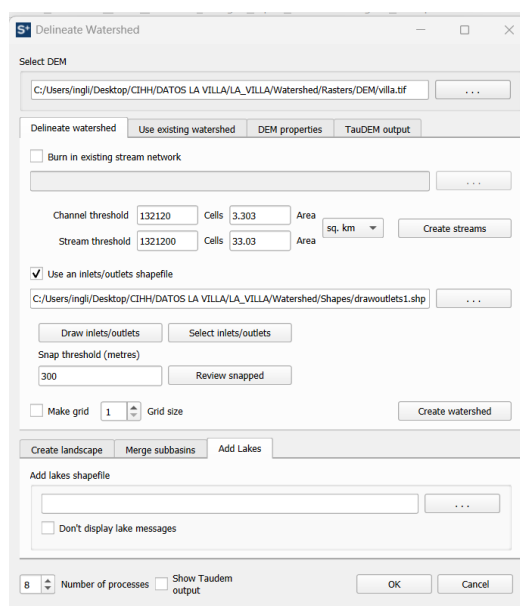


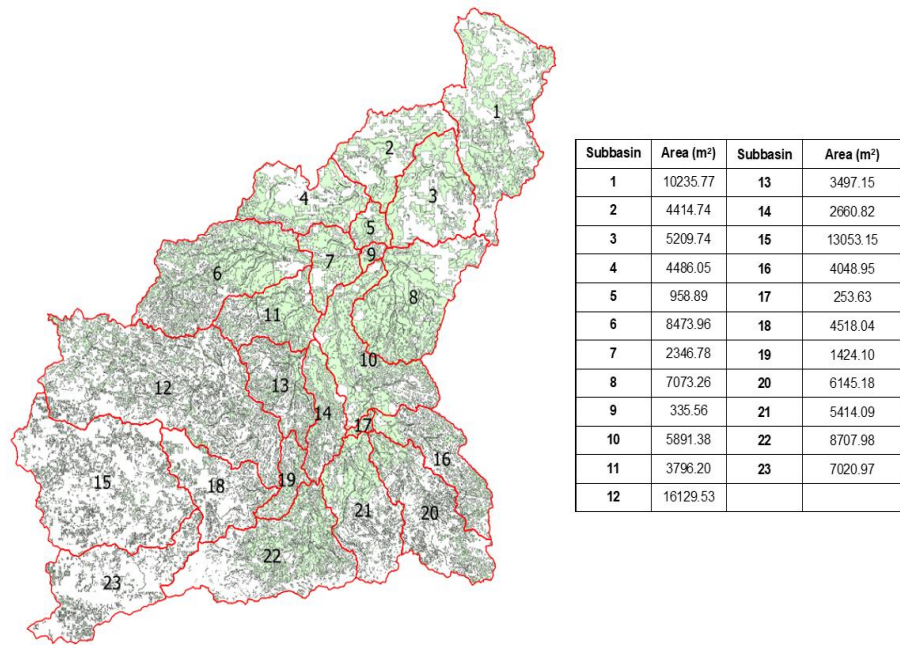
Fuente: Procesamiento cartografía en ArcGIS PRO

La consolidación de la información geoespacial permitió generar un conjunto de productos cartográficos que constituyeron los principales resultados de esta etapa, entre ellos el modelo digital de elevación procesado, los mapas de pendiente, uso del suelo y tipos de suelo, la delimitación de cuencas y subcuencas, la red hidrográfica y la distribución espacial de las HRUs. Estos productos no solo sirvieron como insumo para la implementación del modelo SWAT+, sino que también facilitaron la interpretación espacial de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos desarrollados posteriormente dentro del proyecto.

Los resultados obtenidos evidencian que una adecuada gestión de la información geoespacial constituye un elemento determinante para garantizar la confiabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos. La estandarización de los insumos, la verificación de su consistencia espacial y la integración de múltiples fuentes de información permitieron construir una base cartográfica consistente y adecuada para las etapas posteriores de simulación y análisis, capaz de soportar las etapas posteriores de simulación, calibración y análisis. En este sentido, los productos generados durante esta fase representan un aporte significativo al desarrollo del proyecto IDDS-040 – Evaluación del Potencial Hidrogeológico de Zonas Vulnerables de Panamá: Arco Seco, al proporcionar una representación espacial consistente de las condiciones físicas de las cuencas estudiadas.

Figura 13. Delimitación de las cuencas hidrográficas y red de drenaje generada en QSWAT+.





Fuente: Procesamiento modelo QSWAT+ en QGIS – Paso 1 *Delineate watershed*

Figura 14. Distribución de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs).

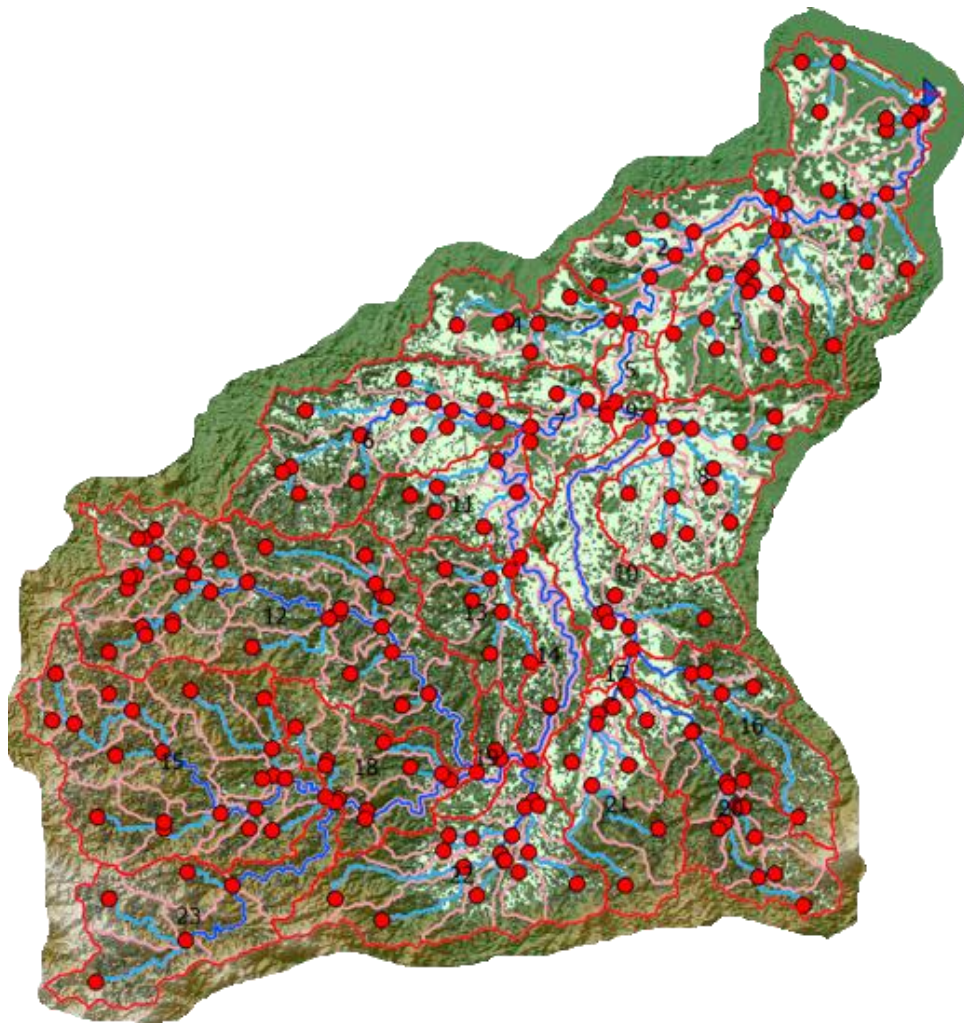
The image displays two screenshots of the QSWAT+ software interface, specifically the 'Create HRUs' dialog box.

Left Screenshot (Landuse and soil tab):

- Select landuse map:** LA\LA_VILLA\MapSwat\LaVilla\MapSWAT\SWAT_INPUT_MAPS\LANDUSE\LULC.discrete_classification.tif
- Select soil map:** op\CHH\DATOS LA VILLA\LA_VILLA\MapSwat\LaVilla\MapSWAT\SWAT_INPUT_MAPS\SOIL\SOIL.b1.tif
- Select landuse and soil database:** C:/Users/ingl/Desktop/CHH/DATOS LA VILLA/LA_VILLA/LA_VILLA.sqlite
- Soil data:** usersoil (selected), STATSGO, SSURGO
- Set slope bands (%):** [Empty field], [Insert], [Clear]
- Slope bands:** [0, 20, 30, 40, 50, 60, 9999]
- Reservoir threshold:** 101 % water
- Optional:** Elevation bands
- Tables:** Landuse lookup: landuse_lookup4, Soil lookup: soil_lookup2, Usersoil: DSOLMap_usersoil1, Plant: plant, Urban: urban
- Select floodplain map (optional):** [Empty field]
- Short channel merge:** Percent of subbasin (selected), Area (ha)
- Read choice:** Read from maps (selected), Read from previous run, Re-merge short channels
- Generate Full-HRUs shapefile:** [Checked]
- Read:** [Button]

Right Screenshot (HRUs tab):

- Optional:** Split landuses, Exempt landuses
- Single/Multiple HRUs:** Dominant landuse, soil, slope (selected), Dominant HRU, Filter by landuse, soil, slope, Filter by area, Target number of HRUs
- Threshold method:** Percent of landscape unit (selected), Area (ha)
- Landuse, soil, slope thresholds:**
 - Landuse (%): 0 to 100
 - Soil (%): 0 to 100
 - Slope (%): 0 to 100
- Ground water:** Use SWAT+ aquifers (selected), Use gwflow
- Create HRUs:** [Button]
- Cancel:** [Button]



Fuente: Procesamiento modelo QSWAT+ en QGIS – Paso 2 *Create HRUs*

Una vez se ejecutó el paso 1 y 2, se procede a exportar los resultados al SWAT+ Editor para la consolidación del modelo hidrológico y la generación del balance hídrico.

Figura 15. Procesamiento en el plugins QSWAT+ para la cuenca río La Villa.



Fuente: Procesamiento modelo QSWAT+ en QGIS – Paso 3 *Run SWAT+*

Resultados del procesamiento en el QSWAT+ para la cuenca Río La Villa:

El número de subcuencas delimitadas: 23

El número total de HRUs generadas:452

3.2. Resultados de la implementación del modelo SWAT+

La implementación del modelo hidrológico SWAT+ permitió desarrollar una representación espacial y funcional de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí, constituyendo uno de los principales resultados técnicos alcanzados durante la pasantía. A partir de la integración de la información geoespacial previamente procesada, fue posible estructurar un modelo hidrológico distribuido capaz de representar los procesos de precipitación, escorrentía, infiltración, evapotranspiración y flujo subterráneo que intervienen en la dinámica hidrológica de las cuencas objeto de estudio.

Como resultado de la implementación del modelo, se obtuvo una estructura hidrológica compuesta por las subcuencas delimitadas durante el procesamiento geoespacial y por las respectivas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs), definidas a partir de la combinación espacial de la pendiente, el uso y cobertura del suelo y los tipos de suelo. Esta estructura permitió representar la heterogeneidad

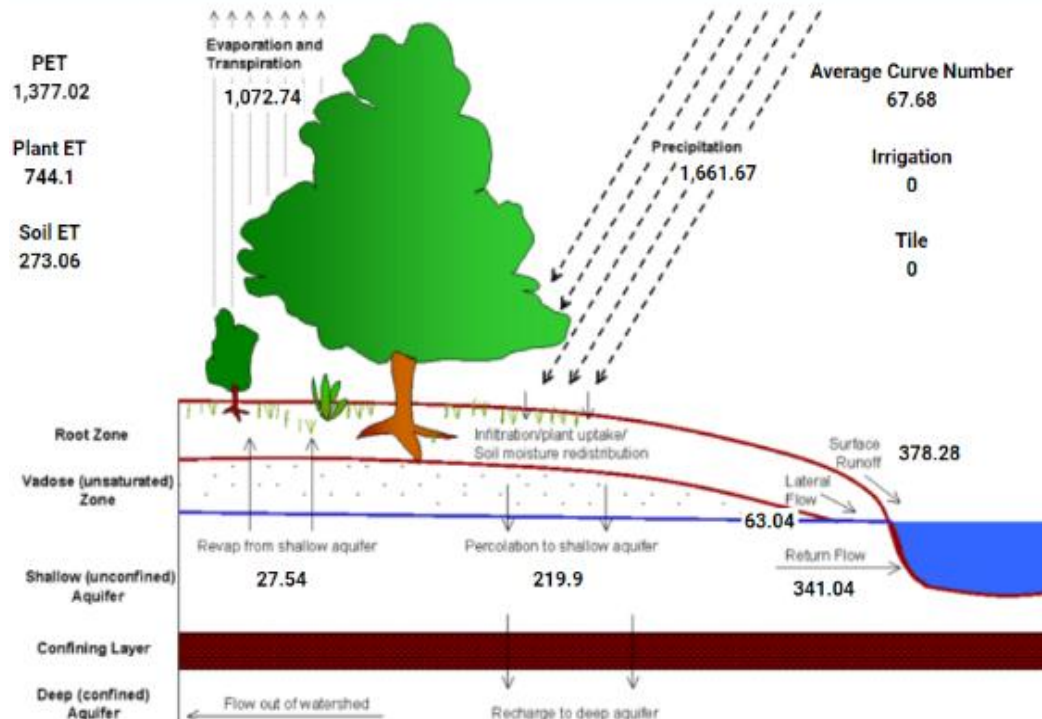
física del terreno y simular de manera diferenciada el comportamiento hidrológico de cada unidad, proporcionando una aproximación más realista de los procesos que ocurren dentro de las cuencas.

La configuración del modelo incorporó la información meteorológica correspondiente a precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, junto con las características topográficas y de cobertura vegetal previamente verificadas. La correcta integración de estos insumos permitió construir un modelo consistente desde el punto de vista espacial y temático, garantizando la compatibilidad entre las diferentes bases de datos y reduciendo posibles fuentes de incertidumbre durante las simulaciones hidrológicas. Este resultado coincide con lo señalado por Arnold et al. (2012), quienes indican que la calidad y consistencia de la información de entrada constituye uno de los factores más determinantes para el desempeño de modelos hidrológicos distribuidos.

Uno de los resultados más relevantes de esta etapa fue la obtención de un modelo completamente estructurado y preparado para las fases de análisis de sensibilidad, calibración y validación. La configuración desarrollada permitió definir adecuadamente la red de drenaje, las conexiones hidrológicas entre subcuencas, las unidades espaciales de simulación y los archivos de entrada requeridos por SWAT+ Editor, verificando el correcto funcionamiento de la estructura del modelo antes de iniciar los procedimientos de ajuste de parámetros.

Durante el proceso de implementación también se verificó la consistencia de la configuración hidráulica e hidrológica mediante simulaciones preliminares, las cuales permitieron identificar posibles inconsistencias en la asignación de parámetros, conexiones entre objetos hidrológicos y representación espacial de las unidades de modelación. Estas verificaciones contribuyeron a garantizar que la estructura conceptual del modelo representara adecuadamente las condiciones físicas presentes en las cuencas de estudio, disminuyendo la posibilidad de errores durante las etapas posteriores de calibración.

Figura 16. Componentes del balance hídrico de la cuenca del río La Villa obtenidos mediante SWAT+ Editor.



Fuente: Procesamiento modelo SWAT+Editor para la cuenca río La Villa

Como resultado de la implementación del modelo SWAT+, se obtuvo la representación de los principales componentes del balance hídrico de la cuenca del río La Villa. La figura permite identificar la distribución del agua dentro del sistema, considerando como entrada principal la precipitación, con un valor de 1.661,67 mm, y su posterior partición entre procesos de evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo lateral, flujo de retorno, infiltración y recarga de los acuíferos.

Posteriormente, el modelo fue preparado para su calibración utilizando SWAT Toolbox, herramienta que permitió desarrollar análisis de sensibilidad e identificar los parámetros con mayor influencia sobre la respuesta hidrológica simulada. Este procedimiento facilitó la evaluación del comportamiento del modelo frente a diferentes combinaciones de parámetros y constituyó la base para optimizar el ajuste entre los caudales simulados y los registros hidrológicos observados.

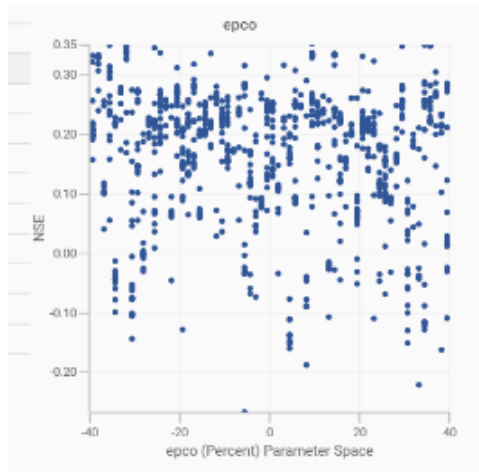
La configuración de la simulación hidrológica en SWAT+ se estableció para el periodo comprendido entre el 01/01/2002 y el 31/12/2011, incorporando un periodo de calentamiento (warm-up) de dos años (2002–2003). Este periodo inicial permitió reducir la influencia de las condiciones iniciales del modelo y favorecer el establecimiento de condiciones hidrológicas más representativas. En consecuencia, el periodo efectivo considerado para la evaluación de los resultados correspondió a 2004–2011.

Aunque las variables climáticas utilizadas como entrada al modelo se encontraban disponibles a escala diaria, se configuró una salida subdiaria con intervalo de una hora con el propósito de disponer de una representación temporal más detallada del tránsito del flujo dentro de la red de drenaje. Esta configuración corresponde al registro de salida del modelo y no implica que las variables climáticas de entrada hayan sido convertidas o generadas artificialmente a una frecuencia horaria. Por tanto, la información horaria se empleó principalmente para el análisis del comportamiento del flujo y su enrutamiento dentro del sistema modelado.

Para la estimación de la evapotranspiración potencial (PET) se empleó el método de Hargreaves, seleccionado en función de la disponibilidad y consistencia de las variables meteorológicas utilizadas como entrada al modelo. Frente al método de Penman-Monteith, que requiere un conjunto más amplio de variables meteorológicas para representar los procesos de intercambio energético y aerodinámico, Hargreaves permite realizar la estimación de la PET a partir de un conjunto reducido de variables, por lo que resulta adecuado para las condiciones de información disponibles durante la implementación del modelo.

Para el tránsito del flujo a través de la red de drenaje se empleó el método de Muskingum, mediante el cual se representa el proceso de almacenamiento y propagación del flujo a lo largo de los cauces. Su implementación permitió considerar el efecto del tránsito del agua dentro de la red hidrográfica y obtener una representación temporal del comportamiento de los caudales en los puntos de salida de la cuenca.

Figura 17. Ejemplo del análisis de sensibilidad de por parámetro analizado.



Fuente: Procesamiento modelo SWAT+ Toolbox para la cuenca río La Villa.

El análisis de sensibilidad de los parámetros hidrológicos se realizó mediante el método Sobol, utilizando como variable de evaluación el caudal mensual observado correspondiente al canal 29 (Channel 29 Monthly River Flow) y como función objetivo el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). El método Sobol corresponde a un enfoque de sensibilidad global, mediante el cual se evalúa la influencia de los parámetros dentro del espacio de variación definido para el modelo. Para el análisis se empleó una semilla de 50 y un total de 1.200 muestras, según la configuración registrada en SWAT+ Toolbox.

Tabla 5. Análisis de sensibilidad global mediante el método Sobol para los parámetros hidrológicos de la cuenca del río La Villa.

Orden	Parámetro	Sensibilidad de primer orden	Interpretación
1	bd	0,53598	Mayor influencia
2	cn2	0,10773	Alta influencia relativa
3	awc	0,08076	Influencia importante
4	epco	0,07664	Influencia importante
5	alpha	0,05083	Influencia moderada
6	perco	0,02803	Influencia baja
7	k	0,01351	Influencia baja
8	revap_min	0,00359	Muy baja
9	canmx	0,00123	Muy baja
10	esco	0,00090	Muy baja
11	surlag	-0,00144	Influencia prácticamente nula

12	flo_min	-0,00423	Influencia prácticamente nula
----	---------	----------	-------------------------------

Fuente: elaboración propia

La sensibilidad se expresó mediante el índice de sensibilidad de primer orden, el cual permite identificar la contribución individual de cada parámetro a la variabilidad de la respuesta del modelo. Los resultados mostraron que el parámetro bd presentó la mayor sensibilidad, con un valor de 0,53598, seguido por cn2 (0,10773), awc (0,08076) y epco (0,07664). En un segundo nivel se ubicaron alpha (0,05083), perco (0,02803) y k (0,01351), mientras que revap_min (0,00359), canmx (0,00123) y esco (0,00090) presentaron una influencia reducida. Finalmente, surlag (-0,00144) y flo_min (-0,00423) mostraron valores cercanos a cero, indicando una contribución marginal dentro del análisis realizado.

Estos resultados permitieron establecer una jerarquización de los parámetros de acuerdo con su influencia sobre la respuesta hidrológica simulada. En particular, la predominancia de bd y la influencia relativa de cn2, awc y epco indican que las propiedades relacionadas con las condiciones del suelo y la respuesta hidrológica de las unidades modeladas tuvieron mayor incidencia en el comportamiento del caudal simulado. Por esta razón, estos parámetros fueron considerados prioritarios durante el proceso posterior de calibración del modelo.

Figura 18. Calibración del modelo SWAT+ con base en los parámetros identificados como sensibles mediante el análisis de sensibilidad.

Name	Change Type	Min	Max	Group	Min Adj.	Curr. Best	Max Adj.	Value	
cn2	Percent	-30.00000	30.00000	hru	-30.000	-16.907	23.434	-16.907	
ovn	Percent	-30.00000	30.00000	hru	-28.950	-21.582	24.164	-21.582	
petco	Percent	-30.00000	30.00000	hru	-26.192	-23.891	3.073	-23.891	fraction
bd	Percent	-30.00000	30.00000	sol	-4.955	9.217	25.260	9.217	mg/m**3
k	Percent	-30.00000	30.00000	sol	-27.826	23.566	30.000	23.566	mm/hr
awc	Percent	-30.00000	30.00000	sol	-30.000	-18.561	30.000	-18.561	mm_H2O/mm
surlag	Percent	-30.00000	30.00000	bsn	-29.330	-22.485	16.369	-22.485	days

Fuente: Procesamiento modelo SWAT+ Toolbox para la cuenca río La Villa

La calibración del modelo hidrológico se realizó mediante el algoritmo Calibration by Latin-Hypercube Sampling Iterations (CALSI), utilizando el método de muestreo Latin Hypercube Sampling (LHS) y el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) como función objetivo. El procedimiento se configuró con 2 iteraciones y un tamaño de lote de 30 simulaciones por iteración, para un total de 60 simulaciones. Estas simulaciones permitieron explorar diferentes combinaciones de los siete parámetros previamente identificados mediante el análisis de sensibilidad y evaluar su efecto sobre la correspondencia entre los caudales observados y simulados.

La incorporación de las series corregidas al modelo hidrológico permitió disponer de información de precipitación ajustada estadísticamente respecto a los registros observados. Estas series fueron utilizadas como información de entrada para la modelación hidrológica y posteriormente para el proceso de calibración de la cuenca del río La Villa. Como resultado del proceso de calibración, se obtuvo un coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) de 0,712. De acuerdo con los criterios propuestos por Moriasi et al. (2007), este valor se encuentra dentro del rango de desempeño considerado como “bueno” ($0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$), lo que evidencia una adecuada capacidad del modelo para representar la variabilidad de los caudales observados durante el periodo de calibración.

Debido al número limitado de simulaciones, el resultado no se interpreta como una optimización exhaustiva del espacio paramétrico ni como la determinación de un óptimo global, sino como una calibración inicial del modelo basado en la exploración del conjunto de parámetros sensibles.

Tabla 6. Valores de ajuste porcentual de los parámetros empleados en la calibración del modelo SWAT+

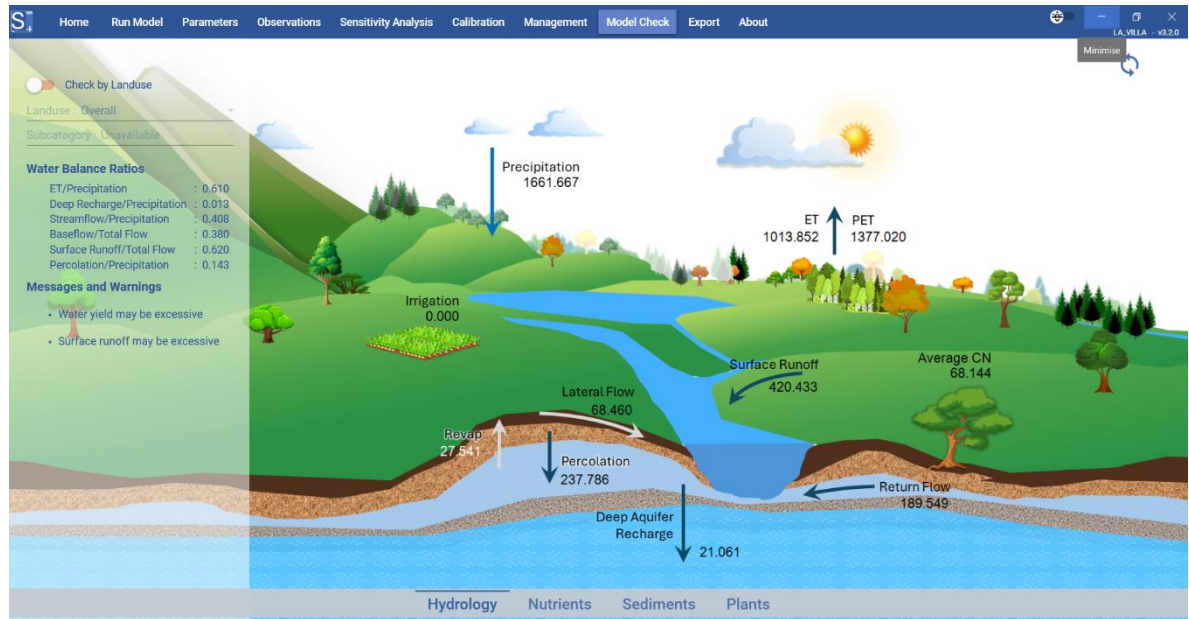
Parámetro	Valor de ajuste (%)
CN2	-16,907
OVN	-21,582
PETCO	-23,891
BD	9,217
K	23,566
AWC	-18,561
SURLAG	-22,485

Fuente: elaboración propia

La calibración del modelo SWAT+ implicó el ajuste porcentual de siete parámetros hidrológicos que presentaron influencia sobre la respuesta simulada del caudal en el punto de control. Los resultados muestran una reducción de CN2 (-16,907 %), OVN (-21,582 %), PETCO (-23,891 %), AWC (-18,561 %) y SURLAG (-22,485 %), mientras que BD (+9,217 %) y K (+23,566 %) presentaron incrementos. En términos generales, estos ajustes modifican principalmente la generación y el tránsito de la escorrentía superficial, la capacidad de almacenamiento y movimiento del agua en el suelo y la representación de la evapotranspiración. El incremento de K favorece una mayor transmisión del agua a través del perfil del suelo, mientras que la disminución de AWC representa una menor capacidad de almacenamiento de agua disponible; por su parte, la reducción de CN2 modifica la respuesta de generación de escorrentía y la disminución de SURLAG afecta el tiempo de respuesta de la escorrentía superficial. El ajuste de BD modifica las propiedades físicas del suelo, mientras que OVN y PETCO intervienen en la representación de la rugosidad superficial y la demanda evaporativa, respectivamente. En conjunto, los resultados reflejan una redistribución de los procesos hidrológicos del modelo orientada a mejorar la representación del caudal observado en el periodo de calibración, aunque los efectos de cada parámetro deben interpretarse de manera conjunta debido a la interacción existente entre los procesos simulados.

La serie denominada “Channel 29 Monthly River Flow” en SWAT+ Toolbox corresponde al registro de caudal utilizado para la calibración de la cuenca del río La Villa. El punto de observación se encuentra asociado a la estación hidrométrica Río La Villa–Atalayita, perteneciente a la red de monitoreo hidrometeorológico del Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA). Por tanto, para efectos de trazabilidad de la información, el identificador Channel 29 utilizado dentro de SWAT+ Toolbox corresponde al punto de control localizado en la estación Río La Villa–Atalayita.

Figura 19. Balance hídrico de la cuenca del río La Villa después del proceso de calibración mediante SWAT+ Toolbox.



Fuente: Procesamiento modelo SWAT+ Toolbox para la cuenca río La Villa

Luego del análisis de sensibilidad y del proceso de calibración, se obtuvo el balance hídrico de la cuenca del río La Villa mediante SWAT+ Toolbox. La precipitación simulada fue de 1.661,67 mm, de la cual 1.013,85 mm correspondieron a evapotranspiración, 420,43 mm a escorrentía superficial, 68,46 mm a flujo lateral y 237,79 mm a percolación hacia el acuífero somero. Adicionalmente, el modelo estimó un flujo de retorno de 189,55 mm, una recarga al acuífero profundo de 21,06 mm y un aporte por revaporización de 27,94 mm. Desde el punto de vista hidrogeológico, la percolación hacia el acuífero somero representa aproximadamente el 14,3 % de la precipitación simulada, mientras que la recarga al acuífero profundo corresponde aproximadamente al 1,3 %, constituyendo estos componentes procesos de interés para el análisis de la transferencia de agua hacia el subsuelo y su posible contribución a la disponibilidad de agua subterránea. Por otra parte, la herramienta SWAT+ Toolbox genera una advertencia asociada a que la escorrentía superficial y el rendimiento hídrico pueden ser elevados, por lo que estos resultados deben interpretarse con precaución y en conjunto con los resultados de calibración.

Tabla 7. Comparación de los componentes del balance hídrico antes y después de la calibración – Cuenca río La Villa.

Componente	Balance inicial	Balance calibrado	Cambio	Interpretación
Precipitación	1.661,67 mm	1.661,67 mm	—	Entrada constante
Evapotranspiración	1.072,74 mm	1.013,852 mm	↓ 58,888 mm	Menor pérdida por ET
Escorrentía superficial	378,28 mm	420,433 mm	↑ 42,153 mm	Mayor generación de escorrentía
Flujo lateral	63,04 mm	68,460 mm	↑ 5,420 mm	Mayor transporte subsuperficial lateral
Percolación al acuífero somero	219,90 mm	237,786 mm	↑ 17,886 mm	Mayor transferencia hacia el acuífero somero
Flujo de retorno	341,04 mm	189,549 mm	↓ 151,491 mm	Menor aporte del acuífero al cauce
Revap	27,54 mm	27,941 mm	↑ 0,401 mm	Cambio muy pequeño
Recarga al acuífero profundo	—	21,061 mm	—	Componente identificado después de la calibración

Fuente: elaboración propia

Los cambios relativos más importantes son:

- Escorrentía: +11,14 %
- Percolación al acuífero somero: +8,13 %
- Flujo de retorno: -44,42 %
- Evapotranspiración: -5,49 %

La comparación del balance hídrico obtenido antes (Figura 17) y después del proceso de calibración (Figura 22) evidencia una modificación en la partición de la precipitación entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico de la cuenca del río La Villa. La precipitación utilizada por el modelo se mantuvo constante en 1.661,67 mm, mientras que los cambios observados corresponden principalmente a la redistribución del agua entre los procesos superficiales y subsuperficiales.

En el balance inicial, la escorrentía superficial fue de 378,28 mm y, después de la calibración, aumentó a 420,43 mm, lo que representa un incremento de aproximadamente 11,14 %. De manera similar, el flujo lateral pasó de 63,04 a 68,46 mm. Estos resultados indican que el modelo calibrado representa una mayor proporción del agua como flujo superficial y lateral dentro de la cuenca.

Desde el punto de vista hidrogeológico, uno de los cambios más relevantes corresponde al incremento de la percolación hacia el acuífero somero, que pasó de 219,90 a 237,79 mm, equivalente a un aumento aproximado del 8,13 %. Este comportamiento indica que, bajo la parametrización obtenida mediante la calibración, se representa una mayor transferencia de agua desde la zona no saturada hacia el sistema acuífero somero. Adicionalmente, el modelo calibrado estima una recarga al acuífero profundo de 21,06 mm, componente que debe considerarse en la interpretación de la dinámica vertical del agua dentro de la cuenca.

En contraste, el flujo de retorno disminuyó de 341,04 a 189,55 mm, correspondiente a una reducción aproximada del 44,42 %. Este resultado indica que, aunque aumenta la percolación hacia el acuífero somero, una menor cantidad de agua es representada por el modelo como descarga subsuperficial hacia la red de drenaje. Por tanto, el incremento de la percolación no implica necesariamente un incremento equivalente del aporte de agua subterránea a los cauces, sino una modificación en la distribución temporal y espacial de los flujos dentro del sistema hidrogeológico.

En conjunto, los resultados muestran que la calibración modificó la representación del balance hídrico, incrementando la escorrentía superficial y la percolación hacia el acuífero somero, mientras redujo de manera importante el flujo de retorno. Esta redistribución resulta relevante para el análisis hidrogeológico de la cuenca, ya que permite identificar que una fracción del agua precipitada es transferida hacia el almacenamiento subsuperficial y potencialmente hacia los acuíferos, aunque su posterior contribución al caudal superficial depende de los procesos de circulación y descarga representados por el modelo.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de SWAT+ permitió consolidar una plataforma de modelación hidrológica estructurada y funcional para el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca del río La Villa. La adecuada estructuración del modelo facilitó la integración de información espacial y climática proveniente de diferentes fuentes, permitiendo representar de manera consistente la respuesta hidrológica de las cuencas frente a las condiciones ambientales presentes en el área de estudio.

Desde una perspectiva técnica, la implementación del modelo constituyó un avance significativo para el proyecto IDDS-040 – Evaluación del Potencial Hidrogeológico de Zonas Vulnerables de Panamá: Arco Seco, debido a que proporcionó una herramienta de simulación capaz de apoyar el análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca y servir como base para futuras evaluaciones relacionadas con la disponibilidad del recurso hídrico, la gestión integrada de cuencas y la

evaluación del potencial hidrogeológico. Asimismo, esta etapa fortaleció las capacidades institucionales del proyecto al disponer de un modelo hidrológico estructurado, reproducible y susceptible de actualización mediante la incorporación de nueva información hidrometeorológica y de monitoreo.

La implementación del modelo SWAT+ evidencia la importancia de integrar información geoespacial de calidad con procedimientos sistemáticos de configuración y verificación del modelo. Diversos autores han señalado que el desempeño de los modelos hidrológicos distribuidos depende no solo de los procesos de calibración, sino también de la calidad de la conceptualización inicial del sistema y de la adecuada representación espacial de sus componentes (Arnold et al., 2012; Bieger et al., 2017).

Adicionalmente, la implementación de SWAT+ proporcionó una plataforma que podrá utilizarse en futuras investigaciones para evaluar escenarios de cambio climático, modificaciones en el uso del suelo, estrategias de manejo de cuencas y procesos de recarga de acuíferos. Esta capacidad de adaptación convierte al modelo en una herramienta estratégica para la gestión sostenible de los recursos hídricos en regiones con alta vulnerabilidad hídrica, como el Arco Seco panameño.

3.3. Análisis del procesamiento y corrección de la información hidroclimática

La disponibilidad de información hidroclimática confiable constituye uno de los principales factores que condicionan el desempeño de los modelos hidrológicos distribuidos. En el desarrollo del proyecto IDDS-040, el procesamiento y la corrección de la información meteorológica permitieron mejorar la calidad de los datos de entrada del modelo SWAT+, reduciendo la incertidumbre asociada a la utilización de registros satelitales y fortaleciendo la representatividad de las simulaciones hidrológicas realizadas para la cuenca del río La Villa.

Como resultado de esta etapa, se consolidó una base de datos hidroclimática integrada, conformada por registros observados suministrados por el Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA) y datos satelitales obtenidos mediante la plataforma NASA POWER. La integración de ambas fuentes permitió ampliar la cobertura espacial de la información meteorológica disponible, aspecto especialmente relevante en regiones donde la densidad de estaciones de monitoreo resulta insuficiente para representar adecuadamente la variabilidad climática de las cuencas hidrográficas.

Debido a que la modelación hidrológica de la cuenca del río La Villa requería información de precipitación para el período 2002–2011, y considerando que los registros observados disponibles correspondían al período 2010–2015 (ver *Anexo K. Datos precipitación diaria UTP 2010-2015_Azuero*), se recurrió a los productos de NASA POWER para ampliar la cobertura temporal de la información hidroclimática. Para este propósito se descargaron series de precipitación para el período 2002–2015. De esta manera, se dispuso de información suficiente para construir las series requeridas para la modelación hidrológica.

Para la aplicación del método Quantile Mapping (QM) se utilizó como período de referencia la información observada disponible entre 2010 y 2015, comparándola con los correspondientes datos de NASA POWER. Además, se contó con un período de traslape de dos años (2010–2011) entre la información observada y el período requerido para la modelación hidrológica. Este intervalo común permitió establecer la correspondencia entre ambas fuentes de información y analizar las diferencias existentes en la distribución de la precipitación. El procedimiento se desarrolló para las tres estaciones consideradas en el estudio: Valle Rico – Los Santos, Pesé y Llano de la Cruz.

Debido al volumen de información hidroclimática que debía organizarse, comparar y procesar para las diferentes estaciones y períodos, se empleó el entorno Jupyter Notebook, utilizando el lenguaje de programación Python, para desarrollar y ejecutar la automatización del procedimiento de Quantile Mapping. Mediante scripts programados en Python se realizó, para cada estación, la lectura y organización de las series, la identificación y tratamiento de los registros requeridos para el análisis, la construcción de la función de corrección y su posterior aplicación sobre la serie de NASA POWER. La automatización permitió procesar de manera sistemática las tres estaciones bajo un procedimiento homogéneo y reproducible, reduciendo la necesidad de procesamiento manual y facilitando la generación de las series corregidas. El script utilizado para la implementación del procedimiento se presenta en el Apéndice A. Script_Quantile_Mapping.

A partir de la relación estadística obtenida entre las series observadas y las series de NASA POWER, se determinaron las funciones de corrección mediante Quantile Mapping. Posteriormente, estas funciones fueron aplicadas de manera retrospectiva a las series de NASA POWER correspondientes al período 2002–2011, con el propósito de generar la precipitación corregida requerida como entrada del modelo SWAT+. En este sentido, 2010–2015 correspondió al período de referencia utilizado para establecer la corrección; 2010–2011 constituyó el período de traslape con el intervalo requerido para la modelación; y 2002–2011 correspondió al período

histórico sobre el cual se aplicó la corrección para generar las series de entrada del modelo.sub

Por tanto, el procedimiento desarrollado no correspondió a una proyección de escenarios futuros, sino a una corrección retrospectiva de la información de precipitación de NASA POWER, mediante la cual se buscó ampliar la cobertura temporal de los datos disponibles y generar una serie consistente para el período de modelación hidrológica. La aplicación independiente del procedimiento para las tres estaciones permitió obtener las series corregidas que posteriormente fueron organizadas e incorporadas como información de entrada al modelo SWAT+.

El análisis comparativo entre las series observadas y los datos satelitales evidenció la presencia de diferencias sistemáticas en la distribución de la precipitación, principalmente asociadas a la magnitud de los eventos y a la frecuencia de ocurrencia de precipitaciones intensas. Estas diferencias confirmaron la necesidad de aplicar un procedimiento de corrección de sesgos antes de incorporar la información meteorológica al modelo hidrológico, evitando que dichos errores se propagaran durante la simulación de los procesos hidrológicos.

Uno de los principales resultados obtenidos durante esta etapa fue el desarrollo de un procedimiento automatizado para la corrección masiva de información hidroclimática mediante *scripts* programados en Python. La automatización permitió procesar simultáneamente las series correspondientes a las diferentes estaciones meteorológicas incluidas en el estudio, disminuyendo considerablemente los tiempos de procesamiento y garantizando la aplicación uniforme de los criterios de corrección. Desde el punto de vista técnico, este desarrollo representa un aporte significativo al proyecto, ya que proporciona una metodología reproducible y fácilmente adaptable para futuras actualizaciones de la información climática o para su aplicación en otras cuencas hidrográficas con características similares.

La incorporación de las series corregidas al modelo hidrológico permitió disponer de información de precipitación ajustada estadísticamente respecto a los registros observados. Estas series fueron utilizadas como información de entrada para la modelación hidrológica y posteriormente para el proceso de calibración de la cuenca del río La Villa. Con los resultados disponibles no se establece de manera independiente el efecto cuantitativo de la corrección mediante Quantile Mapping sobre el desempeño del modelo hidrológico.

Adicionalmente, el procesamiento automatizado desarrollado durante la pasantía constituye un aporte técnico con potencial de aplicación institucional. La estructura

de los *scripts* implementados facilita la incorporación de nuevas series climáticas, la actualización periódica de las bases de datos meteorológicas y la estandarización del procesamiento de información hidrológica en proyectos futuros. Este tipo de herramientas contribuye a optimizar los tiempos de análisis, mejorar la trazabilidad del procesamiento de datos y garantizar la reproducibilidad de los procedimientos, aspectos que actualmente son considerados buenas prácticas en investigaciones relacionadas con modelación hidrológica y gestión de recursos hídricos. Ver *apéndice A – Script usado para la automatización del Quantile Mapping*.

Tabla 8. Comparación estadística entre las series de precipitación observadas y corregidas.

Quantile Mapping aplicado EST. Llano Cruz	
Parámetro	Valor
Sumatoria precipitación observada (mm)	9314.1
Sumatoria precipitación corregida (mm)	9315.9
Error relativo (%)	0.019%
Bias Ratio	1.0002

Quantile Mapping aplicado EST. Pesé	
Parámetro	Valor
Sumatoria precipitación observada (mm)	8766.10
Sumatoria precipitación corregida (mm)	8754.00
Error relativo (%)	-0.138%
Bias Ratio	0.9986

Quantile Mapping aplicado EST. Valle Rico	
Parámetro	Valor
Sumatoria precipitación observada (mm)	7526.8
Sumatoria precipitación corregida (mm)	7518.61
Error relativo (%)	-0.109%
Bias Ratio	0.9989

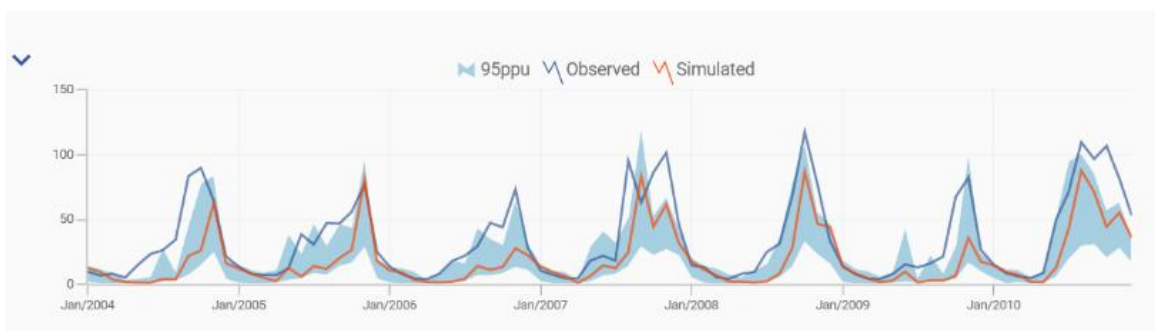
Fuente: elaboración propia.

La aplicación del método Quantile Mapping permitió ajustar las series de precipitación mediante la reducción del sesgo respecto a los registros de referencia. En las estaciones analizadas, la comparación de las sumatorias de precipitación observada y corregida muestra diferencias relativas reducidas, con valores de 0,019 % para Llano Cruz, -0,138 % para Pesé y -0,109 % para Valle Rico, mientras que los respectivos Bias Ratio fueron de 1,0002, 0,9986 y 0,9989. Estos resultados evidencian que, para el periodo utilizado en el ajuste, las series corregidas presentan una magnitud acumulada muy próxima a la observada. No obstante, esta

comparación corresponde al mismo periodo empleado utilizado para evaluar las series corregidas y no constituye por sí sola una validación independiente del método. La evaluación de la capacidad del método para reproducir eventos no utilizados en su calibración requeriría una validación cruzada mediante un período independiente.

En conjunto, los resultados obtenidos durante esta etapa permitieron generar series de precipitación corregidas y compatibles con los requerimientos de entrada del modelo SWAT+. La aplicación de Quantile Mapping redujo el sesgo acumulado entre las series observadas y corregidas durante el período utilizado para el ajuste. Estos resultados aportan una base hidrocimática más consistente para la modelación; no obstante, la cuantificación del efecto de esta corrección sobre el desempeño hidrológico requiere una evaluación mediante períodos independientes.

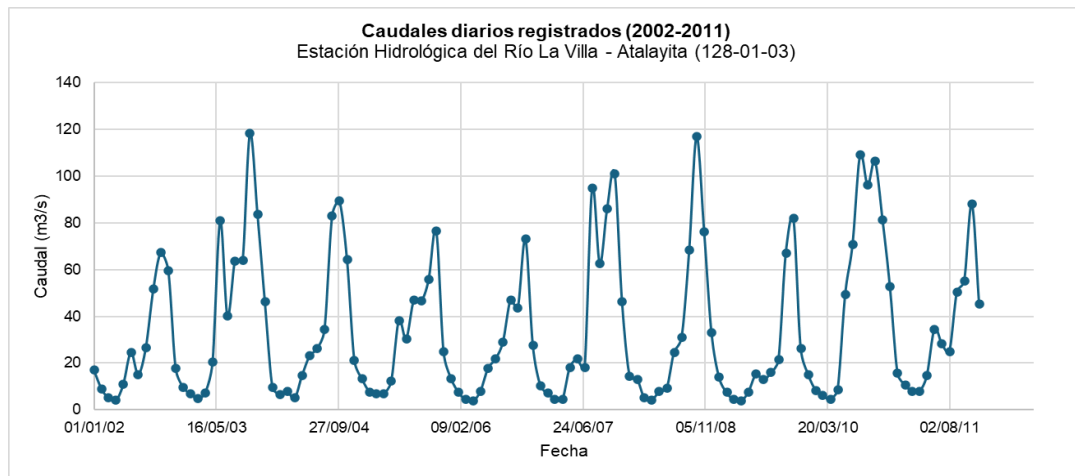
Figura 20. Comparación de los hidrogramas obtenidos con información climática original (observada) y corregida con la data simulada con el SWAT+.



Fuente: Procesamiento modelo SWAT

La aplicación del método Quantile Mapping permitió obtener una serie de precipitación corregida que posteriormente fue utilizada como entrada del modelo SWAT+. La comparación entre los caudales simulados y los registros observados muestra que el modelo reproduce de manera general la variabilidad temporal de la respuesta hidrológica; sin embargo, se evidencia una subestimación de algunos eventos de mayor magnitud, particularmente en los años 2004, 2008 y 2010.

Figura 21. Caudal observado Est. Río La Villa – Atalayita (2002-2011)



Fuente: elaboración propia.

Esta diferencia indica que, aunque el modelo representa la dinámica general de los caudales, persisten limitaciones en la reproducción de los picos de escorrentía. El desempeño de la calibración fue evaluado mediante el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), utilizado como única función objetivo, obteniéndose un valor de 0,712, correspondiente a un desempeño clasificado como bueno según los criterios de Moriasi et al. (2007). Por tanto, el resultado del NSE debe interpretarse conjuntamente con el comportamiento gráfico de las series, reconociendo las diferencias observadas en los eventos de mayor magnitud.

3.4. Resultados del monitoreo hidrogeológico

La campaña de monitoreo hidrogeológico desarrollada durante la pasantía constituyó uno de los principales componentes de apoyo al proyecto, al contribuir en la obtención de información primaria necesaria para el fortalecimiento de la red de monitoreo de aguas subterráneas en las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí. Las actividades desarrolladas permitieron apoyar la instrumentación de pozos, la adquisición de información de campo y la recolección de muestras de agua subterránea destinadas a estudios posteriores, generando insumos técnicos para las siguientes fases de investigación del proyecto.

Uno de los principales resultados obtenidos durante esta etapa fue la participación en la instalación y configuración de transductores de presión destinados al monitoreo continuo de los niveles piezométricos. La instrumentación de los pozos permitió dejar implementado un sistema de adquisición automática de datos capaz de registrar las fluctuaciones del nivel del agua subterránea durante periodos prolongados, información indispensable para futuros análisis relacionados con la dinámica de los acuíferos y los procesos de recarga. La correcta instalación y verificación del funcionamiento de estos equipos representó un avance importante para el fortalecimiento de la infraestructura de monitoreo del proyecto. Como parte de la instrumentación, también se participó en la instalación de sensores barométricos utilizados para la compensación de la presión atmosférica registrada por los sensores automáticos. Este procedimiento constituye una etapa fundamental en programas de monitoreo piezométrico, ya que permite corregir las mediciones obtenidas por los transductores y mejorar la precisión de los niveles de agua registrados. La implementación adecuada de este sistema garantiza que la información generada durante el monitoreo continuo pueda ser utilizada posteriormente en análisis hidrogeológicos con un mayor grado de confiabilidad.

Durante la campaña se realizaron igualmente mediciones manuales de los niveles de agua y la verificación del estado físico de los pozos monitoreados. Estas actividades permitieron comprobar el adecuado funcionamiento de los equipos instalados, registrar las condiciones de cada punto de monitoreo y documentar información complementaria relacionada con la infraestructura existente, las condiciones de acceso y el entorno hidrogeológico. La información recopilada fortaleció la base de datos del proyecto y proporcionó un registro inicial para el seguimiento de los pozos instrumentados. Otro de los resultados alcanzados durante la campaña fue la recolección de muestras de agua subterránea destinadas a la determinación de parámetros hidroquímicos. La participación durante la pasantía comprendió las actividades de preparación, toma, preservación, rotulación y registro de las muestras siguiendo los protocolos establecidos por el equipo de investigación, garantizando la trazabilidad y las condiciones requeridas para su posterior análisis en laboratorio.

Es importante precisar que los análisis de laboratorio correspondientes a estas muestras fueron desarrollados con posterioridad a la finalización de la pasantía. En consecuencia, los resultados analíticos de parámetros como nitratos y ortofosfatos no hacen parte del alcance del presente informe y, por tanto, no son objeto de interpretación. No obstante, la participación en las actividades de muestreo permitió adquirir experiencia en procedimientos de campo para la obtención de muestras representativas de agua subterránea, así como comprender la importancia del aseguramiento de la calidad durante las etapas iniciales del monitoreo hidrogeológico.

Adicionalmente, durante la gira técnica se realizó el reconocimiento de diferentes sectores de interés hidrogeológico dentro del área de estudio, incluyendo la inspección de un afloramiento termal. Estas actividades permitieron observar las condiciones geológicas e hidrogeológicas presentes en la región, comprender la relación entre la geología local y la circulación del agua subterránea, y complementar la interpretación conceptual del sistema acuífero evaluado por el proyecto. Desde una perspectiva técnica, la campaña de monitoreo permitió integrar el trabajo de campo con las actividades de modelación hidrológica desarrolladas durante la pasantía. Mientras el modelo SWAT+ proporciona una representación numérica del comportamiento hidrológico superficial de las cuencas, las actividades de instrumentación y monitoreo constituyen la base para generar información observacional que permitirá validar e interpretar, en etapas posteriores del proyecto, la respuesta del sistema hidrogeológico frente a las condiciones climáticas y a los procesos de recarga. Esta integración entre información de campo y herramientas de modelación es ampliamente reconocida en la literatura como una estrategia fundamental para fortalecer la confiabilidad de los estudios hidrogeológicos y la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Uno de los principales aportes de la participación en esta campaña fue el fortalecimiento de las competencias técnicas en monitoreo hidrogeológico, instrumentación de pozos, manejo de equipos especializados, aplicación de protocolos de muestreo y registro sistemático de información de campo. Estas experiencias complementaron los conocimientos adquiridos durante las actividades de gabinete y permitieron comprender la importancia de la información primaria como soporte para el desarrollo de modelos hidrológicos y estudios hidrogeológicos de mayor complejidad.

En conjunto, los resultados obtenidos durante la campaña de monitoreo hidrogeológico evidencian la importancia del trabajo de campo dentro de proyectos de investigación orientados a la evaluación de los recursos hídricos subterráneos. La participación en la instrumentación de pozos, la adquisición de información de campo y la recolección de muestras constituyó un aporte significativo al desarrollo del proyecto, al contribuir con la implementación de una red de monitoreo que servirá de base para futuras investigaciones sobre el comportamiento hidrogeológico de las cuencas La Villa y Tonosí.

En las inspecciones de campo se identificaron 21 puntos de agua, correspondientes a pozos y manantiales. La Tabla 3 presenta un resumen de los puntos inspeccionados y sus principales condiciones, mientras que el inventario detallado se presenta en el *Anexo I. Pozos visitados e instrumentados durante la campaña de monitoreo – Gira técnica 31/03/26 al 01/04/26*.

Tabla 9. Pozos visitados e instrumentados durante la campaña de monitoreo.

ID	Localización	Tipo de estructura	Código	Fecha	Observación principal
1	Los Hatillos de Pese	Pozo	P2	30/03/26	Sin observaciones adicionales.
2	Las Flores	Pozo	P11	30/03/26	Se instaló levellogger.
3	Las Cabras	Pozo	P12	30/03/26	Pozo tapado. No viable para el estudio.
4	San Luis Gonzaga	Pozo	P10	30/03/26	Se obtuvo muestra de agua.
5	El Rodeito	Pozo	P9	30/03/26	No se obtuvo muestra. Se instaló levellogger.
6	Chupá	Pozo	L1	30/03/26	No se obtuvo muestra por bomba dañada.
7	El Bombacho	Pozo	L2	31/03/26	Nivel de agua próximo a la superficie.
8	El Chirote	Manantial	S1	31/03/26	Manantial comunitario.
9	Los Leales	Pozo	L3	31/03/26	No fue posible establecer contacto con el propietario.
10	Villa Lourdes	Pozo	P8	31/03/26	Se instaló levellogger. Nivel de agua muy bajo.
11	Tonosí	Pozo	GPS 005	31/03/26	Sin observaciones adicionales.
12	Vía Dr. Belisario Porras	Pozo	GPS 006	31/03/26	Se instalaron levellogger y barologger.
13	Vía Dr. Belisario Porras	Pozo	GPS 007	31/03/26	El pozo no existe según la inspección.
14	La Corosita, Tonosí	Manantial	GPS 008	31/03/26	No fue posible acceder a la toma.
15	Carretera Llano de Piedra–Tonosí	Pozo	GPS010	31/03/26	No fue posible acceder al punto.
16	Pese	Pozo	GPS 013	30/03/26	Se instalaron barologger y levellogger.
17	Los Pozos	Pozo	GPS 014	30/03/26	Acceso restringido y pozo seco.
18	Cerro Gordo de las Minas	Pozo	GPS 015	31/03/26	No fue posible acceder al pozo.
19	Cerro Gordo de las Minas	Pozo	GPS 016	31/03/26	No fue posible acceder al pozo.
20	La Palma/Tonosí	Manantial	S2	31/03/26	Punto de agua termal.
21	Ministerio de Ambiente – Chitré	Pozo	L5	01/04/26	Se instaló levellogger.

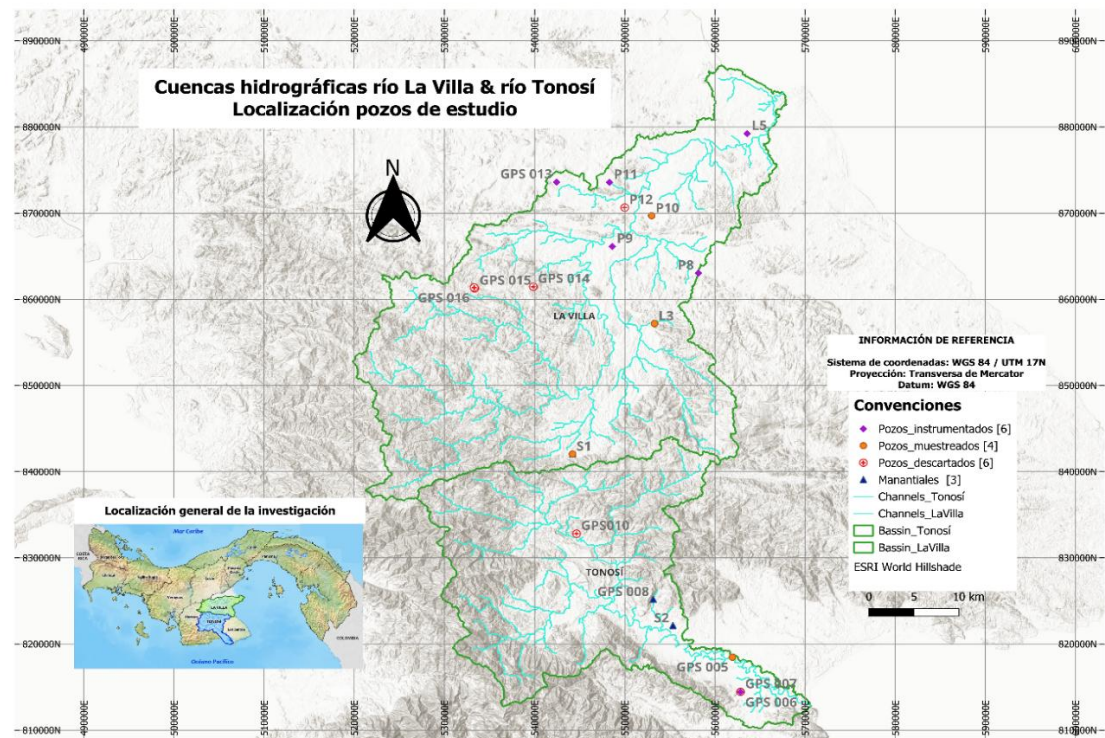
Fuente: elaboración propia

En el anexo I. *Pozos visitados e instrumentados durante la campaña de monitoreo – Gira técnica 31/03/26 al 01/04/26*. Se registró una conductividad eléctrica de 8.987 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un TDS de 4.493 ppm en el pozo GPS 006, valores considerablemente superiores a los registrados en los demás puntos monitoreados. Este comportamiento constituye un valor atípico que requiere verificación y análisis complementario. Entre las posibles causas se consideran una mayor mineralización natural del agua, procesos de evaporación y concentración de sales, interacción agua–roca o, en menor medida, aportes asociados a contaminación o influencia salina. Sin embargo, estas hipótesis no pueden confirmarse únicamente con los parámetros de campo, por lo que requieren ser contrastadas mediante análisis fisicoquímicos e hidroquímicos complementarios. Para el periodo de ejecución de la

presente pasantía, los análisis fisicoquímicos complementarios previstos para profundizar en la interpretación de este comportamiento excedieron el alcance temporal de las actividades desarrolladas. En consecuencia, la caracterización y análisis detallado de este resultado quedará como parte de las fases posteriores de la investigación y de las actividades desarrolladas por los demás colaboradores del proyecto, de acuerdo con la programación y disponibilidad de los análisis correspondientes.

La temperatura registrada, cercana a 38 °C, corresponde al punto identificado como manantial termal de aguas calientes. Este comportamiento térmico es consistente con la naturaleza del sitio y explica la diferencia respecto a las temperaturas registradas en los demás puntos de monitoreo. Por tratarse de una característica particular del punto, su interpretación debe realizarse dentro del contexto hidrogeológico local y no como un valor representativo de la totalidad de los pozos monitoreados en Azuero.

Figura 22. Ubicación de los pozos monitoreados.



Fuente: elaboración propia – QGIS 3.40.15

3.5. Integración y discusión de los resultados para la evaluación del potencial hidrogeológico

Los resultados obtenidos durante las diferentes etapas de la pasantía permitieron integrar información hidroclimática, espacial, hidrológica e hidrogeológica como insumo para la evaluación del potencial hidrogeológico de zonas vulnerables del Arco Seco de Panamá. Esta aproximación integral resulta pertinente para una región donde la información hidrogeológica disponible aún es limitada y donde factores como la estacionalidad climática, el uso del suelo y la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas influyen en la disponibilidad y comportamiento del recurso hídrico (Castrellón et al., 2021).

En este contexto, la investigación contemplaba inicialmente el desarrollo de la modelación hidrológica de las cuencas de los ríos La Villa y Tonosí, con el propósito de generar una herramienta que permitiera analizar la respuesta hidrológica de ambas cuencas y aportar posteriormente a la evaluación de los procesos asociados con la recarga y el potencial hidrogeológico. Durante la pasantía fue posible desarrollar la estructuración espacial, parametrización y configuración de los modelos SWAT+ para ambas cuencas. Sin embargo, el avance hacia las etapas de calibración y validación estuvo condicionado por la disponibilidad de registros hidrométricos observados. Para la cuenca del río La Villa se contó con información de caudales que permitió avanzar hasta la etapa de calibración; mientras que para la cuenca del río Tonosí no se dispuso, durante el período de ejecución de la pasantía, de los registros hidrométricos necesarios para evaluar el desempeño del modelo. La información fue solicitada formalmente al Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA), pero no fue recibida durante el período de la pasantía, situación que condicionó el alcance de la modelación para esta cuenca y que se encuentra documentada en el Anexo H. En consecuencia, el modelo de Tonosí quedó estructurado y configurado como una base para la continuidad de la investigación, mientras que las etapas de calibración y validación quedaron sujetas a la disponibilidad posterior de registros de caudal.

Para la cuenca del río La Villa, el balance hídrico simulado permitió identificar una precipitación media de 1661,67 mm, de los cuales 237,79 mm corresponden a percolación hacia el sistema de aguas subterráneas someras, equivalente aproximadamente al 14,3 % de la precipitación, mientras que 21,06 mm corresponden a la recarga dirigida hacia el acuífero profundo, equivalente aproximadamente al 1,3 %. Estos resultados deben interpretarse de acuerdo con la estructura conceptual de SWAT+, en la cual el agua que atraviesa el perfil del suelo mediante percolación ingresa a la zona vadosa y posteriormente puede contribuir a la recarga de los acuíferos somero y profundo.

Asimismo, el flujo de retorno constituye una componente importante de la respuesta hidrológica simulada, debido a la contribución del almacenamiento subterráneo al caudal superficial. En SWAT+, el acuífero somero puede aportar agua a los cauces mediante flujo base; por tanto, la relación obtenida entre el flujo base y el caudal total representa una aproximación al aporte subsuperficial dentro del régimen simulado. Este comportamiento resulta de interés para el Arco Seco, donde investigaciones previas han evidenciado la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas y han identificado sectores donde los ríos pueden recibir aportes provenientes de los acuíferos (Castrellón et al., 2021). No obstante, el valor obtenido en el presente estudio corresponde a una estimación del modelo y no a una medición directa del aporte de agua subterránea.

La identificación de zonas potenciales de recarga también debe analizarse conjuntamente con las características físicas de la cuenca. Un estudio desarrollado mediante SWAT+ en la cuenca del río La Villa identificó áreas de recarga asociadas con sectores donde se han presentado cambios en el uso del suelo hacia actividades agrícolas y ganaderas. Estas transformaciones pueden modificar la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración, afectando los procesos de recarga del agua subterránea (Noel Amaya et al., 2021). En este sentido, los resultados obtenidos resaltan la importancia de considerar conjuntamente la precipitación, las propiedades del suelo, la cobertura y uso del suelo, la generación de escorrentía y la percolación para interpretar el comportamiento espacial del potencial de recarga.

Los resultados del monitoreo hidrogeológico también evidenciaron diferencias importantes entre los puntos evaluados. Particularmente, el punto GPS 006 presentó una conductividad eléctrica de 8987 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y sólidos disueltos totales de 4493 ppm, valores considerablemente superiores a los registrados en los demás puntos. Este comportamiento constituye un valor atípico que requiere verificación y análisis complementario. Entre las posibles causas pueden encontrarse una mayor mineralización natural, concentración de sales asociada con procesos de evaporación, interacción agua-roca o influencia de fuentes externas de salinidad; sin embargo, los parámetros registrados en campo no permiten establecer por sí solos el origen de esta condición. Estudios hidroquímicos realizados en el Arco Seco han evidenciado heterogeneidad en la composición de las aguas subterráneas y variaciones en las facies hidroquímicas relacionadas con las condiciones geológicas y la interacción agua-roca (González-González et al., 2023). Asimismo, investigaciones recientes en la provincia de Herrera han señalado procesos de interacción agua-roca y posibles influencias de salinidad en determinados sectores del Arco Seco (Acosta et al., 2026). Por ello, el comportamiento observado en GPS 006 debe considerarse como un resultado que requiere análisis hidroquímico complementario.

De igual manera, el punto identificado como manantial de aguas calientes, con una temperatura cercana a 38 °C, representa una condición particular dentro de la red de monitoreo. La presencia de aguas termales ha sido documentada en estudios realizados en el Arco Seco, particularmente en la subcuenca del río Zaratí, donde se han identificado aguas termales asociadas con sistemas acuíferos profundos (González-González et al., 2023). No obstante, la temperatura registrada durante la campaña permite caracterizar la condición térmica del punto, pero no permite determinar por sí sola su origen o profundidad de circulación, por lo que estos aspectos requieren estudios hidroquímicos e hidrogeológicos complementarios.

En cuanto al desempeño del modelo de la cuenca del río La Villa, la calibración obtuvo un NSE de 0,712, utilizando este indicador como única función objetivo. De acuerdo con los criterios propuestos por Moriasi et al. (2007) para evaluaciones mensuales de caudal, este valor corresponde a un desempeño bueno, al encontrarse dentro del intervalo de 0,65 a 0,75. Sin embargo, el indicador debe interpretarse conjuntamente con la representación gráfica de los caudales, debido a que se observa una subestimación de algunos eventos de mayor magnitud, particularmente durante los años 2004, 2008 y 2010. Por tanto, aunque el modelo reproduce de manera general la variabilidad temporal de los caudales observados, persisten diferencias en la representación de los eventos de mayor magnitud. Moriasi et al. (2007) señalan la importancia de complementar los indicadores estadísticos con el análisis gráfico del comportamiento simulado y observado.

Desde la perspectiva del balance hídrico, los resultados obtenidos después de la calibración muestran una redistribución de los componentes del ciclo hidrológico simulado. La escorrentía superficial aumentó de 378,28 a 420,43 mm, mientras que la evapotranspiración disminuyó de 1072,74 a 1013,85 mm y la percolación hacia el acuífero somero aumentó de 219,90 a 237,79 mm. Paralelamente, el flujo de retorno disminuyó de 341,04 a 189,55 mm. Estos cambios muestran que el ajuste de los parámetros modifica la distribución del agua entre los diferentes componentes del balance.

En conjunto, los resultados obtenidos constituyen una aproximación al comportamiento hidrológico e hidrogeológico de las cuencas estudiadas, con un mayor nivel de desarrollo para la cuenca del río La Villa debido a que la disponibilidad de registros hidrométricos permitió realizar su calibración. Para Tonosí, los productos desarrollados durante la pasantía —principalmente la estructuración espacial y configuración del modelo— constituyen la base técnica necesaria para continuar con la calibración, validación y evaluación hidrológica una vez se disponga de registros de caudal observados. Por tanto, la evaluación del potencial hidrogeológico del Arco Seco debe entenderse como un proceso

progresivo que requiere integrar la modelación hidrológica con información hidrogeológica, hidroquímica, piezométrica y de campo. Esta integración resulta especialmente relevante en el Arco Seco, donde la investigación existente señala la necesidad de fortalecer el conocimiento sobre los sistemas de aguas subterráneas y su interacción con las aguas superficiales (Castrellón et al., 2021).

3.6. Seminario de sustentación de avance y aporte en la investigación

Como actividad de cierre se realizó la consolidación del informe técnico de pasantía, integrando las actividades desarrolladas durante la estancia, los resultados obtenidos y los principales aprendizajes derivados de la experiencia. Posteriormente, se realizó la presentación del trabajo ante integrantes del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá, como espacio de socialización de los resultados y aportes realizados al proyecto IDDS-040.

Fotografía 6. Presentación de los resultados del trabajo desarrollado durante la pasantía internacional



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Seminario de sustentación pasantía internacional

La presentación permitió exponer las principales actividades desarrolladas durante la pasantía, incluyendo el trabajo de campo, el monitoreo e instrumentación de pozos, el procesamiento de información geoespacial y la modelación hidrológica mediante SWAT+. Esta actividad constituyó el cierre de la experiencia y permitió comunicar los productos y aprendizajes obtenidos durante la estancia.

Fotografía 7. Participantes del seminario de sustentación de la pasantía internacional en el CIHH-UTP.



Fuente: Autoría 2026 – Ref. Seminario de sustentación pasantía internacional

3.7. Matriz de cumplimiento de objetivos.

La matriz de cumplimiento presenta la relación entre los objetivos específicos establecidos para la pasantía, las actividades desarrolladas durante el periodo de vinculación, las evidencias incorporadas en el presente informe y el grado de cumplimiento alcanzado. Esta evaluación permite delimitar el alcance efectivo de las actividades realizadas durante la estancia en el CIHH y diferenciar aquellas que fueron desarrolladas y documentadas durante la pasantía de aquellas cuyos productos o resultados fueron obtenidos con posterioridad.

En particular, para las actividades relacionadas con el análisis de muestras de agua subterránea, durante la pasantía se participó en las actividades de campo asociadas con la toma y manejo de las muestras; sin embargo, los correspondientes análisis de laboratorio fueron realizados con posterioridad a la finalización de la estancia. Adicionalmente, debido a las condiciones de confidencialidad y divulgación establecidas para los productos generados en el marco del proyecto financiado, la información analítica obtenida no se encuentra disponible para su incorporación en el presente informe sin la autorización institucional correspondiente. Por lo anterior, el objetivo relacionado con los análisis de nitratos (NO_3^-) y ortofosfatos (PO_4^{3-}) se establece como parcialmente cumplido, dado que se desarrolló la etapa de campo y obtención de las muestras, pero no fue posible incorporar ni interpretar los resultados analíticos dentro del periodo y alcance de la pasantía.

Tabla 10. Matriz de seguimiento y cumplimiento de objetivos

Objetivo específico	Actividades desarrolladas	Evidencia en el informe	Grado de cumplimiento	Comentarios
Desarrollar experiencia en mediciones piezométricas en campo en pozos de Azuero.	Reconocimiento de los sitios de monitoreo, medición de niveles piezométricos y actividades de campo en pozos de las cuencas de La Villa y Tonosí.	Capítulo 3, resultados de actividades de campo; bitácora de gira de campo; Anexo E. Informe de gira de campo.	Total	
Apoyar en la instalación, descarga y mantenimiento de transductores de presión.	Instalación de transductores y sensores de nivel en diferentes pozos; configuración de sensores para registro de datos cada 30 minutos.	Capítulo 3, resultados de monitoreo e instrumentación; fotografías de campo; Anexo E. Informe de gira de campo.	Total	
Realizar muestreos para análisis de nitratos (NO_3^-) y	Participación en actividades de campo relacionadas con la toma de muestras de agua en pozos seleccionados.	Bitácora e informe de gira de campo. No se presentan en el informe resultados de laboratorio de	Parcial	El objetivo se considera parcialmente cumplido. Durante la pasantía se participó en la toma

ortofosfatos (PO_4^{3-}).		nitratos y ortofosfatos.		y manejo de muestras de agua subterránea; sin embargo, los análisis de laboratorio fueron realizados con posterioridad a la finalización de la estancia. Adicionalmente, los productos generados en el marco del proyecto financiado están sujetos a restricciones de divulgación previa a su publicación, por lo que los resultados analíticos no fueron incorporados al presente informe.
Georreferenciar pozos y construir un inventario con atributos asociados.	Recopilación y organización de información de los puntos de agua, ubicación de pozos y consolidación de información asociada.	Capítulo 3, resultados de actividades de campo e inventario de puntos de agua; tablas y mapa de localización.	Total	
Apoyar en la calibración de un modelo SWAT+ para las áreas de estudio, incluyendo procesamiento de imágenes ráster y uso de SIG.	Procesamiento de DEM, cartografía e información espacial; generación de cuencas y HRU mediante QSWAT+; configuración y calibración del modelo hidrológico para La Villa; análisis de sensibilidad y ajuste de parámetros.	Capítulo 3, modelación hidrológica; figuras y tablas de resultados; NSE = 0,712 para la calibración de La Villa.	Parcial	El objetivo se cumplió para la cuenca del río La Villa, donde se realizó la calibración del modelo y se obtuvo un NSE de 0,712. Para la cuenca del río Tonosí se completó la estructuración y configuración del modelo, pero no fue posible realizar la calibración debido a

				la falta de registros hidrométricos observados durante la pasantía.
Elaborar un informe técnico final y presentar un seminario de resultados y aprendizajes.	Elaboración del informe de pasantía y preparación/sustentación del trabajo al finalizar la estancia.	Informe de pasantía; bitácora, donde se registra la sustentación del trabajo el 29 de abril de 2026.	Total	

Fuente: elaboración propia

4. CONCLUSIONES

- La implementación del modelo hidrológico SWAT+ para la cuenca del río La Villa permitió delimitar 23 subcuencas y 452 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), constituyendo una representación espacial suficientemente detallada para analizar la respuesta hidrológica de la cuenca. La calibración realizada a escala mensual alcanzó un NSE de 0,712, valor clasificado como bueno de acuerdo con los criterios de Moriasi et al. (2007). No obstante, la subestimación observada en algunos eventos de mayor magnitud evidencia que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica general, pero mantiene limitaciones en la representación de los caudales máximos.
- El análisis del balance hídrico de la cuenca del río La Villa permitió cuantificar los principales componentes de la respuesta hidrológica simulada. Para una precipitación de 1661,67 mm, el modelo estimó 1013,85 mm de evapotranspiración, 420,43 mm de escorrentía superficial, 68,46 mm de flujo lateral y 237,79 mm de percolación hacia el sistema de aguas subterráneas someras. Adicionalmente, se estimaron 21,06 mm de recarga hacia el acuífero profundo, equivalentes aproximadamente al 1,3 % de la precipitación. Estos resultados muestran que la modelación permite establecer una primera cuantificación de los procesos de transferencia de agua hacia el subsuelo; sin embargo, los valores de recarga corresponden a estimaciones del modelo y requieren contraste con información hidrogeológica y piezométrica.
- Para la cuenca del río Tonosí se logró completar la estructuración espacial y configuración del modelo hidrológico, pero no fue posible obtener un desempeño cuantitativo mediante calibración y validación. Esta limitación se produjo porque durante el período de la pasantía no se recibió la información de caudales observados solicitada al IMHPA. Por tanto, el resultado para Tonosí debe expresarse como un modelo estructurado y preparado para las siguientes etapas de calibración y validación, y no como un modelo calibrado. Esta condición representa una limitación asociada a la disponibilidad de información durante la estancia y no una exclusión de Tonosí del planteamiento inicial de la investigación.
- La aplicación de Quantile Mapping permitió reducir el sesgo acumulado entre las series de precipitación observada y corregida a valores inferiores al 0,14 %. Para Llano Cruz, Pesé y Valle Rico se obtuvieron errores relativos de 0,019 %, -0,138 % y -0,109 %, respectivamente, con razones de sesgo de 1,0002, 0,9986 y 0,9989. Estos resultados evidencian una elevada correspondencia en términos de precipitación acumulada entre las series observadas y corregidas. Sin embargo, dado que la evaluación presentada corresponde a un período utilizado en el proceso de ajuste y no constituye una evaluación independiente del método, por lo que se recomienda realizar

posteriormente una validación cruzada con períodos independientes y métricas adicionales de desempeño.

- La campaña de monitoreo hidrogeológico permitió ampliar y fortalecer la base de información primaria del proyecto. Se inspeccionaron 21 puntos de agua, correspondientes a 18 pozos y 3 manantiales, de los cuales 14 pozos fueron considerados viables para el estudio; adicionalmente, se instalaron 6 Levelloggers y 2 Barologgers para el seguimiento de los niveles piezométricos. Estos resultados representan un avance cuantificable en la consolidación de la red de monitoreo y proporcionan información que podrá utilizarse posteriormente para analizar la variabilidad temporal de los niveles de agua subterránea y contrastar los resultados de la modelación.
- Las mediciones fisicoquímicas permitieron identificar condiciones hidroquímicas diferenciadas que requieren análisis posterior. En particular, el punto GPS 006 presentó una conductividad eléctrica de 8987 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y TDS de 4493 ppm, valores notablemente superiores a los registrados en los demás puntos de monitoreo. Este comportamiento constituye un resultado relevante para la caracterización del sistema, aunque no permite establecer por sí solo el origen de la elevada mineralización. Por tanto, se recomienda verificar estos registros y complementarlos con análisis hidroquímicos antes de atribuirlos a procesos específicos como interacción agua-roca, concentración por evaporación o influencia salina.
- El objetivo relacionado con el muestreo para nitratos y ortofosfatos se cumplió parcialmente durante el período de la pasantía, debido a que se realizaron las actividades de campo, extracción y preservación de las muestras destinadas al análisis, pero los resultados analíticos de laboratorio no estuvieron disponibles dentro del período de ejecución de la estancia. En consecuencia, no es metodológicamente apropiado establecer conclusiones cuantitativas sobre las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} a partir de las actividades desarrolladas durante la pasantía; dichos resultados deberán incorporarse en etapas posteriores, previa disponibilidad y autorización para su utilización.
- En conjunto, los resultados obtenidos permitieron generar una base técnica cuantificable para la continuidad del proyecto IDDS-040, conformada por un modelo SWAT+ calibrado para La Villa con $\text{NSE} = 0,712$, un modelo estructurado para Tonosí pendiente de calibración por falta de registros hidrométricos, series de precipitación corregidas mediante Quantile Mapping con errores inferiores al 0,14 %, y una red de monitoreo fortalecida mediante 21 puntos evaluados y 8 instrumentos instalados. Estos productos permiten avanzar hacia una evaluación más completa del potencial hidrogeológico del Arco Seco mediante la integración futura de modelación hidrológica, niveles piezométricos, información hidroquímica y registros hidrométricos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y RECURSOS

5.1. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, D., Guevara Williams, C., & Osorio, H. (2026). Hidroquímica de las aguas subterráneas en la provincia de Herrera: análisis mediante diagrama de Piper. *Revista de Iniciación Científica*, 12(2), 5–9. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v12.2.4398>

Autoridad Nacional del Ambiente. (2013). *Las aguas subterráneas de la región del Arco Seco y la importancia de su conservación*. República de Panamá. ISBN 978-9962-651-80-2.

Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute.

Atencio, B. (2019). *Cuantificación de flujos de agua subterránea utilizando trazadores ambientales: Isótopos estables y minerales disueltos*. Cuenca de Parita, Panamá. VIII Congreso Científico de la Región de Azuero, II Congreso Internacional: El Agua es esencia de vida, paz y desarrollo mundial.

Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115–130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

Castrellón, M. G., Muñoz, M., Guerra-Chanis, G., Leiva, J. A., Foglia, L., & Fábrega, J. (2021). Las aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá: Un tesoro por explorar. *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, 113–119. <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3180>

González-González, A., Fábrega-Duque, J., Adar, E., & Atencio, B. (2023). Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas en la subcuenca del río Zaratí. *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, 196–201. <https://doi.org/10.33412/apanac.2023.3935>

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Muñoz, Y., Salceda, M., & Fábrega, J. (2025). *Desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual, utilizando hidrología isotópica y variables hidroquímicas para la cuenca del río La Villa, Panamá*. Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC. <https://doi.org/10.33412/apanac.2025.85>

Noel Amaya, J. O., Fábrega, J., & Castrellón, M. G. (2021). Identificación de áreas de recarga a través de un modelo hidrológico en la región del Arco Seco de Panamá. *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, 251–256. <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3193>

Opolenko de Arjona, V. (2021). Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, República de Panamá. *Revista Geográfica de América Central*, 2(67), 109–146. <https://doi.org/10.15359/rgac.67-2.4>

Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>

5.2. RECURSOS

ArcGIS Pro 3.x. Environmental Systems Research Institute (ESRI). <https://www.esri.com>

Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”. (s.f.). *Información geoespacial de Panamá*. <https://www.ignpanama.gob.pa>

Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA). (s.f.). *Información hidrometeorológica*. <https://www.imhpa.gob.pa>

Ministerio de Ambiente de Panamá. (s.f.). *Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA)*. <https://www.sinia.gob.pa>

NASA. (s.f.). *NASA POWER Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov>

Texas A&M AgriLife Research / USDA-ARS. (2022). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. <https://swat.tamu.edu>

Universidad Tecnológica de Panamá. (s.f.). *Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH)*. <https://cihh.utp.ac.pa>

6. APÉNDICES Y ANEXOS

- **Apéndice A.** Script en Python para la corrección de sesgo mediante Quantile Mapping.
- **Anexo A.** Carta de aceptación de la pasantía internacional.
- **Anexo B.** Plan de trabajo aprobado.
- **Anexo C.** Bitácora de actividades.
- **Anexo D.** Informes de avance.
- **Anexo E.** Informe de gira de campo.
- **Anexo F.** Certificado de finalización de la pasantía.
- **Anexo G.** Registro del Uso de Inteligencia Artificial
- **Anexo H.** Solicitud climática CIHH_UTP_MAR2026
- **Anexo I.** Pozos visitados e instrumentados durante la campaña de monitoreo – Gira técnica 310326 al 010426
- **Anexo J.** Anexo J. Registro de capturas de interfaz y procesamiento en software SWAT+
- **Anexo K.** Datos precipitación diaria UTP 2010-2015_Azuero