



Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería en Construcción

Informe final del proyecto de investigación:

Evaluación cuantitativa, espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca del Río Agua Caliente mediante la construcción y análisis de balances hídricos

Investigador:

Maikel Méndez Morales

Cartago, enero 2016

## TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE CUADROS.....	6
RESUMEN .....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUCCION .....	9
2 MARCO CONCEPTUAL .....	11
3 OBJETIVOS .....	14
3.1 bjetivos Específicos.....	14
4 METODOLOGIA.....	15
4.1 Objetivo 1. Instrumentación de campo .....	15
4.2 Objetivo 2. Mapas de uso del suelo.....	16
4.2.1 Verificación del nivel de georeferenciación.....	16
4.2.1 Aplicación de algoritmos de clasificación espectral.....	17
4.3 Objetivo 3. Modelos de elevación de terreno.....	18
4.3.1 Parámetros cartográficos .....	18
4.3.2 Orientación externa.....	19
4.3.3 Aerotriangulación analítica digital (AAD).....	19
4.3.4 Orientación interna .....	20
4.3.5 Generación de modelos de elevación digital (DEMS) .....	21
4.3.6 Control de calidad.....	22
4.3.7 Hidroprocesamiento.....	22
4.4 Objetivo 4. Modelos hidrológicos.....	24

4.4.1 El modelo HBV-TEC .....	24
4.4.1.1 Rutina de precipitación.....	25
4.4.1.2 Rutina de humedad de suelo.....	25
4.4.1.3 Función de respuesta .....	26
4.4.1.4 Función de transformación .....	27
4.4.1.5 Paquetes y funciones en R.....	27
4.4.1.6 Funciones objetivo y estadísticas de desempeño.....	27
4.4.1.7 Estructura de archivos en HBV-TEC .....	29
4.4.2 El modelo SWAT .....	30
4.4.2.1 Escorrentía .....	32
4.4.2.2 Redistribución e infiltración .....	32
4.4.2.3 Evapotranspiración .....	32
4.4.2.4 Flujo lateral.....	32
4.4.2.5 Percolación .....	32
4.2.6 Estructura de archivos en SWAT .....	33
4.4.3 Optimización paramétrica.....	34
4.5 Objetivo 5. Balance hídrico.....	36
4.6 Objetivo 6. Indicadores de desempeño .....	37
4.6.1 Índice de disponibilidad per cápita de agua (DPCA) .....	38
4.6.2 Índice de aridez.....	38
4.6.3 Índice de escasez .....	39
5 RESULTADOS Y ANALISIS .....	40
5.1 Objetivo 1. Instrumentación de campo .....	40
5.1.1 Datos de precipitación .....	40

5.1.2 Datos de flujos .....	42
5.2 Objetivo 2. Mapas de uso del suelo.....	44
5.3 Objetivo 3. Modelos de elevación de terreno.....	45
5.3.1 Modelo de elevación digital (DEM).....	45
5.3.2 Hidroprocesamiento.....	47
5.3.3 Pendiente .....	47
5.3.4 Dirección en laderas .....	49
5.3.5 Discretización de subcuencas .....	50
5.4 Objetivo 4. Modelos hidrológicos.....	52
5.4.1 Desempeño de modelos hidrológicos.....	52
5.4.2 Optimización paramétrica.....	56
5.4.3 Tendencia de los modelos hidrológicos al sesgo.....	62
5.5 Objetivo 5. Balance hídrico.....	63
5.6 Objetivo 6. Indicadores hidrológicos .....	64
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	68
6.1 Objetivo 1. Instrumentación de campo .....	68
6.2 Objetivo 2. Mapas de uso del suelo.....	68
6.3 Objetivo 3. Modelos de elevación de terreno.....	69
6.4 Objetivo 4. Modelos hidrológicos.....	69
6.5 Objetivo 5. Balance hídrico.....	70
6.6 Objetivo 6. Indicadores hidrológicos .....	70
7 AGRADECIMIENTOS .....	71
8 REFERENCIAS.....	72

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 .....	16
Figura 2 .....	17
Figura 3 .....	18
Figura 4 .....	20
Figura 5 .....	21
Figura 6 .....	22
Figura 7 .....	23
Figura 8 .....	24
Figura 9 .....	26
Figura 10 .....	26
Figura 11 .....	27
Figura 12 .....	31
Figura 13 .....	35
Figura 14 .....	39
Figura 15 .....	40
Figura 16 .....	41
Figura 17 .....	42
Figura 18 .....	43
Figura 19 .....	43
Figura 20 .....	45
Figura 21 .....	46
Figura 22 .....	48
Figura 23 .....	49

Figura 24 .....	50
Figura 25 .....	51
Figura 26 .....	53
Figura 27 .....	54
Figura 28 .....	55
Figura 29 .....	55
Figura 30 .....	58
Figura 31 .....	59
Figura 32 .....	61
Figura 33 .....	66
Figura 34 .....	67

**LISTA DE CUADROS**

Cuadro 1.....	15
Cuadro 2.....	36
Cuadro 3.....	36
Cuadro 4.....	38
Cuadro 5.....	39
Cuadro 6.....	44
Cuadro 7.....	48
Cuadro 8.....	50
Cuadro 9.....	51
Cuadro 10.....	52
Cuadro 11.....	53
Cuadro 12.....	57
Cuadro 13.....	60
Cuadro 14.....	63
Cuadro 15.....	65

## RESUMEN

La cuenca del Río Agua Caliente, localizada en la provincia de Cartago, Costa Rica, fue evaluada mediante la construcción y análisis de balances hídricos. Para ello, los modelos hidrológicos **HBV-TEC** y **SWAT** fueron aplicados a tres subcuencas del río Agua Caliente. Ambos modelos fueron parameterizados utilizando información espacial proveniente de la constelación de satélites **WorldView**, incluyendo imágenes multi-espectrales y estereoscópicas tomadas durante 2011. Estos productos incluyen mapas de hidroprocesamiento derivados a partir de un modelo de elevación digital (DEM) y mapas de uso del suelo. Los registros meteorológicos y de flujos fueron obtenidos mediante instrumentación de campo para un periodo de 675 días (2013-2015). El programa **PEST** fue utilizado en la calibración y optimización de ambos modelos.

Los resultados indican que el modelo **HBV-TEC**; desarrollado durante la ejecución de este proyecto utilizando el lenguaje de programación **R**, muestra un desempeño superior al modelo **SWAT** en términos de todas las funciones objetivo utilizadas. No obstante, El desempeño de ambos modelos varía considerablemente entre subcuencas; al punto que se considera satisfactorio para algunas e insatisfactorio para otras. Lo anterior, se atribuye primordialmente a la insuficiencia de la red meteorológica de captar la variabilidad climática de la cuenca como un todo. Sin embargo, el modelo **HBV-TEC** demostró una alta adaptabilidad para generar balances hídricos confiables en cuencas con datos limitados y alta variabilidad geomorfológica. Finalmente, los indicadores climáticos e hidrológicos considerados, requieren de periodos de observación extensos que permitan analizar tendencias o patrones a través del tiempo bajo un contexto de análisis estadístico.

**Palabras clave:** HBV-TEC, Modelación hidrológica, PEST, R, SWAT

## ABSTRACT

The Agua Caliente River catchment, located in the province of Cartago, Costa Rica, was analyzed by means of the construction and analysis of water balances. For this purpose, the hydrological models **HBV-TEC** and **SWAT** were applied to three different subcatchments of the Agua Caliente River. Both models were parameterized using spatial information from the **WorldView** satellite constellation which included multi-spectral and stereoscopic imagery acquired during 2011. These products include hydroprocessing maps derived from a digital elevation map (DEM) and a series of land use maps. Historical records of meteorological variables and fluxes were registered by means of field instrumentation for a period of 675 days (2013-2015). The software **PEST** was used for calibration and optimization of both models.

Results suggest that the **HBV-TEC** model; developed during the project execution using the **R** programming language, shows a higher performance when compared to the **SWAT** model in terms of the objective functions considered. Nonetheless, the performance of both models considerably varies among subcatchments, reaching satisfactory conditions for some subcatchments but unsatisfactory conditions for others. This can mainly attributed to a limited meteorological network which is incapable of fully capturing the climate variability of the catchment as a whole. Nevertheless, the **HBV-TEC** model has shown adaptability and flexibility when applied to catchments with limited data and high morphological variability.

Finally, the selected climatic and hydrological indicators require extended periods of field observations in order to identify patterns through time, under a context of statistical analysis.

**Keywords:** HBV-TEC, Hydrological modelling, PEST, R, SWAT

## 1 INTRODUCCION

La cuenca del Río Agua Caliente, la cual forma parte de la cuenca alta del Río Reventazón, es una de las más importantes del país en cuanto a producción de recursos hídricos. El uso del suelo en la cuenca abarca un amplio espectro de actividades desde agricultura y pastoreo en la zona norte, hasta cultivos extensivos bajo invernadero en las zonas oeste y sur.

Al mismo tiempo, la de la ciudad de Cartago, con usos urbano, comercial e industrial de alta densidad; imprime una alta vulnerabilidad a la contaminación y demás problemas hídricos asociados. Por otro lado, la cuenca del Río Agua Caliente drena directamente en el embalse de Cachí, por lo que su contribución a la producción de energía hidroeléctrica es incuestionable.

Dada su importancia en el tema del manejo de recursos hídricos, la elaboración de balances hídricos, tanto generales como a nivel de subcuenca, permitiría determinar el potencial real de producción hídrica de la cuenca de acuerdo a objetivos específicos.

Sin embargo, para conseguir un balance hídrico representativo y más aún, pronosticar su comportamiento futuro, es indispensable contar con los recursos humanos y materiales necesarios para dicha tarea. Lo anterior, incluye el contar con el personal capacitado, equipos e instrumentación, hardware, software y lo más importante, los registros históricos de observaciones de campo; tanto meteorológicos como de flujos.

Desafortunadamente, el monitoreo permanente y la construcción de registros históricos de observaciones de campo es costoso y lento, sobre todo a largo plazo; ya que en hidrología se requiere de observaciones controladas a lo largo de periodos de tiempo relativamente extensos.

Mucha de la información base que se requiere en la evaluación de la cuenca, debe estar incluida en la caracterización y diagnóstico inicial de la misma. Es claro que el monitoreo de variables hidrológicas, no ha recibido la atención necesaria; no solo en Costa Rica, sino también en la mayoría de los países en desarrollo.

Poca experiencia existe en materia de elaboración de balances hídricos en Costa Rica, aparte de aquellos elaborados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), los cuales son de uso interno y no pueden ser de conocimiento o aprovechamiento público.

Es igualmente complejo, acceder los datos de campo que son colectados por diferentes instituciones nacionales, ya que existen protocolos y trabas burocráticas que hacen todavía más difícil la obtención y utilización de la información.

Por otra parte, en la elaboración de cualquier balance hídrico, debe contarse con modelos computacionales capaces de describir los procesos hidrológicos clave de una cuenca. En este sentido, existe diversidad de modelos hidrológicos que podrían ser utilizados dependiendo de los objetivos de caso de estudio. La selección del o los modelos hidrológicos dependerá de varios aspectos, siendo la disponibilidad de información (*principalmente registros de observaciones*) el factor de mayor peso e importancia. Otro aspecto a considerar, es el tipo de estructura del modelo y el sistema de ecuaciones que se utilizan en la resolución del balance hídrico. Importante sería, estar en capacidad de desarrollar (*o adaptar*) un modelo hidrológico que se adapte a las necesidades de cada caso de estudio o de una región en particular. Para ello, es necesario un conocimiento profundo de los mecanismos que gobiernan la hidrología de una región, aunado a las capacidades de desarrollo de software y programación que el desarrollo de tal modelo representaría. Un ejercicio interesante sería entonces, comparar la eficiencia de modelos ampliamente utilizados contra aquellos desarrollados localmente.

De la misma forma, es indispensable contar con un caso de estudio que tenga las características mínimas para ser utilizado en tal ejercicio. En este sentido, la cuenca del Río Agua Caliente exhibe diversas particularidades que la hacen apropiada como objeto de estudio. Geomorfológicamente, presenta regiones de muy alta pendiente hacia el norte y regiones paradójicamente llanas hacia el oeste, en el área de Valle del Guarco. No se debe dejar de lado la complejidad de usos del suelo que se tienen y la rápida evolución de cambio que la misma ha experimentado en los últimos años.

Este proyecto, persigue inventariar los recursos hídricos superficiales de la cuenca del Río Agua Caliente a través de la construcción de balances hídricos orientados a determinar el potencial real de producción hídrico de la cuenca. Al mismo tiempo, se espera el desarrollo de un modelo hidrológico local (**HBV-TEC**) que pueda ser utilizado en el resto del territorio costarricense e incluso a nivel internacional. Se pretende también, la comparación del modelo local, contra un modelo hidrológico físicamente basado de vasta aplicación y amplia publicación (**SWAT**). Todo lo anterior, se alcanzará a través del uso de modelos espaciales, herramientas estadísticas, derivación de indicadores de desempeño y automatización de instrumentos, todo con el fin de aplicar los conocimientos desarrollados a la solución de problemas reales relacionados con el manejo y la administración de los recursos hídricos. Al mismo tiempo, este proyecto pretende impactar en materia de investigación, docencia y transferencia tecnológica, fundamentado en los productos que de él se generen. No se dejan de lado, publicaciones indexadas a nivel internacional en relación a los resultados del mismo.

Es importante resaltar, que como parte del proyecto de investigación-VIE denominado “*Sistema de vigilancia y monitoreo para la prevención de desastres por inundación en el sistema de cuencas del Río Toyogres y la Quebrada Zopilote en Dulce Nombre de Cartago*”, el cual se llevó a cabo entre Enero de 2011 y Junio de 2012; se adquirieron los equipos, instrumentos, datos espaciales, y equipo de computación necesarios para llevar a cabo los objetivos de la presente proyecto.

Finalmente, como continuación de este proyecto, se espera que el **HBV-TEC** pueda ser utilizado en un futuro estudio de regionalización hidrológica a nivel nacional, una vez que los escenarios de Cambio Climático **PRECIS** hayan sido concluidos.

## 2 MARCO CONCEPTUAL

El concepto de balance hídrico, se deriva de las leyes físicas ligadas al balance y conservación de masa, donde todas las entradas, salidas y reacciones dentro de un volumen de control son identificadas y cuantificadas. Desde el punto de vista hidrológico, se alcanza un equilibrio entre los flujos que entran, reaccionan y finalmente salen de la cuenca durante un intervalo de tiempo definido (Lhomme *et al.* 2004).

Dada la extensión geográfica de una cuenca; en la actualidad, es necesario hacer uso de los Sistemas de Información Geográfica (*GIS por sus siglas en inglés*) y de las herramientas de teledetección en el tratamiento, manipulación y presentación de las variables geográficas.

Los sistemas **GIS**, poseen funciones de análisis espacial muy robustas, las cuales pueden ser utilizadas en la construcción de un modelo con características espacialmente distribuidas. La aplicación de sistemas **GIS** en modelos hidrológicos, se ha convertido en una práctica usual en los últimos años (Seth *et al.* 2006). Los desarrollos alcanzados con la tecnología **GIS**, lo cual incluye modelos de elevación digital, mapas de uso y cobertura, suelos y textura, curvas de nivel, ortofotografías, acumulación y pendiente de una red de drenaje; pueden ser utilizados en la extracción automática de parámetros característicos de un modelo hidrológico (Forte *et al.* 2006). Consecuentemente, como primer paso, es necesaria la elaboración de modelos de elevación digital del terreno que permitan derivar parámetros geomorfológicos relevantes, tales como pendientes e índices de forma. De la misma forma, se requiere derivar los mapas de uso del suelo más actuales que se tengan de la zona de interés. En la actualidad, la manera más eficaz de derivar dichos productos es a través del uso de imágenes satelitales, tanto estereoscópicas como multiespectrales (Sudhira 2004).

Satélites tales como *WorldView*, *GeoEye*, *Ikonos* y otros, son capaces de suministrar resoluciones espaciales que varían de 0.50 m a 5.00 m (Cuartero *et al.* 2004); con lo que el nivel de detalle incorporado en cuanto a particularidades y heterogeneidades del terreno resulta muy alto. Lo anterior, mejora la confiabilidad de las proyecciones y disminuye la incertidumbre global de su utilización.

Para la elaboración confiable de un balance hídrico, sobre todo cuando las resoluciones temporales esperadas son relativamente altas, se necesita la utilización de un modelo hidrológico que sea capaz de describir todos los componentes del balance hídrico que se dan a escala natural. Existe diversidad de modelos hidrológicos continuos, dentro de los que destacan los modelos *conceptuales* y los modelos *físicos* (Rientjes 2010). Los modelos conceptuales, son aquellos que incluyen información fisiográfica de la cuenca y factores climatológicos, de una forma simplificada. En la mayoría de los casos, las descargas de flujo se relacionan al almacenamiento mediante ecuaciones simplificadas de conservación de masa, funciones de recesión y funciones de transformación. Los parámetros que caracterizan este tipo de modelos son generalmente de carácter numérico-conceptual y no necesariamente representan cantidades medibles en el plano real. Por su relativa simplicidad y demostrada adaptabilidad, los modelos conceptuales son los más ampliamente utilizados. Por otro lado, los modelos conceptuales son más sencillos o “parsimoniosos” y requieren por ende un menor grado de parameterización, menor cantidad de parámetros ajustables, menores recursos computacionales, menor compensación de errores y mayor confiabilidad (Harremoës & Madsen 1999; Becker & Braun 1999).

En consecuencia, se reduce el grado de auto-correlación y co-dependencia entre los parámetros. Esto es particularmente práctico en materia de hidrología, donde la calibración depende

esencialmente de un pequeño grupo de observaciones de flujo en puntos clave de la cuenca. Aun cuando existen diversas técnicas orientadas a disminuir el espacio paramétrico y las fuentes de incertidumbre de un modelo, la típica suposición que los parámetros permanecen constantes con el tiempo es aplicable únicamente a ciertas variables de estado (Moradkhani & Sorooshian 2008). Consecuentemente, es necesario establecer un procedimiento que puede proporcionar estimaciones confiables sobre la variación de los parámetros a través de tiempo.

Desde el punto de vista de aplicación, uno de los modelos conceptuales más exitosos a nivel mundial es el modelo semidistribuido **HBV** (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*). El modelo **HBV**, fue desarrollado por el *Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)* de Suecia en la década de 1970, orientado principalmente a la administración de centrales hidroeléctricas. (Bergström 1976; Bergström 1995; Lindström *et al.* 1997). Sin embargo, su uso se ha extendido a lo largo de los años a temas tales como la predicción hidrológica, simulación de flujos y descargas, análisis de crecidas, diseño de infraestructuras y Cambio Climático (Booij 2005; Kobold & Brilly 2006; Wale *et al.* 2009).

El modelo **HBV** incluye rutinas para la acumulación de precipitación, cálculo de la humedad del suelo, recarga de aguas subterráneas, y un procedimiento de cálculo de propagación de la onda hidráulica simplificado. Desde su desarrollo inicial, el **HBV** ha sido modificado y adaptado por diversos grupos de investigación (Hundecha & Bardossy 2004; Lawrence *et al.* 2009; Seibert & Vis 2012). Lo anterior, demuestra la flexibilidad del modelo **HBV** y evidencia su potencial para ser adaptado a condiciones locales muy diversas.

Por otro lado, los modelos físicos son aquellos concebidos para representar de una forma explícita y determinística, los procesos físicos que describen el comportamiento de una cuenca hidrológica (Rientjes 2010). Estos modelos, tienen la desventaja de ser extremadamente demandantes en cuanto a la cantidad, calidad y resolución de la información requerida en su ejecución. Es este sentido, sus parámetros son de carácter físico y por lo tanto, son medibles y correlacionables. Dentro de los modelos físicos más utilizados e investigados en la actualidad se encuentra **SWAT** (Arnold *et al.* 1990). **SWAT**, (*acrónimo de Soil and Water Assessment Tool*) es un modelo semidistribuido continuo de resolución temporal diaria, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de *Texas A&M*. **SWAT** fue originalmente concebido para analizar el impacto que las actividades humanas tienen sobre una cuenca hidrológica, lo cual incluye las prácticas de manejo y uso de la tierra, arrastre de sedimentos, pesticidas e incluso nutrientes.

Dado que todos estos aspectos tienen una relación directa con los flujos hidrológicos, **SWAT** posee un potente motor de cálculo que ha sido evaluado en diversas circunstancias y escenarios (Easton *et al.* 2008). **SWAT**, puede ejecutarse en diversas plataformas **GIS**, lo que facilita la construcción de y creación de archivos de entrada y salida.

Independientemente del tipo de modelo, para que éste se considere confiable, debe ser capaz de predecir el comportamiento del sistema real bajo una amplia gama de condiciones sobre un periodo extendido de tiempo. Lo anterior, debe lograrse mediante la calibración del modelo.

La calibración, se alcanza mediante el ajuste secuencial de los parámetros del modelo (*optimización*); en el cual se realiza una comparación cuantitativa de la respuesta del modelo contra datos observados; evaluados a su vez por una o varias funciones objetivo (Gupta & Sorooshian 1985). En consecuencia, resulta determinante la existencia de registros históricos suficientemente robustos. Dado que el proceso de calibración-optimización de un modelo es una tarea altamente compleja desde el punto de vista matemático, comúnmente se utilizan algoritmos

de calibración automática que ejecutan estos procesos de forma mucho más rápida y confiable (Kumar *et al.* 2009). Por otra parte, en un sistema hidrológico real, pueden existir cientos de incógnitas y tan solo una cantidad relativamente baja de observaciones, principalmente registros de flujo. Pueden haber entonces, muchas soluciones que proporcionen resultados igualmente buenos en términos de las funciones objetivo seleccionadas para evaluar el modelo, arribando a una situación de “equifinalidad” (Duan *et al.* 1992; Fang & Ball 2007). Esta ambigüedad acarrea un serio impacto sobre la incertidumbre de los parámetros que consecuentemente limita la aplicabilidad del modelo. Con el objeto de disminuir el número de incógnitas y mejorar la confiabilidad sobre las predicciones del modelo, es necesario restringir el espacio paramétrico (Beven & Binley 1992). Una acción obvia en la restricción de un modelo hidrológico es la discretización de la cuenca de áreas tributarias o subcuencas que compartan características y condiciones similares tales como cobertura, pendiente, dirección de flujo y área climática. Todo lo anterior, justifica aún más el uso de modelos hidrológicos conceptuales de naturaleza parsimónica.

De la misma forma, la calibración manual de los parámetros de un modelo es un proceso desgastante y subjetivo, por lo que resulta difícil evaluar la confiabilidad de tales predicciones. Los algoritmos de optimización, buscan minimizar las desviaciones entre los valores modelados y los observados, dentro de un rango de tolerancia previamente definido. Un algoritmo de optimización, debería ser capaz de encontrar el mínimo absoluto de la función y a su vez, linealizar un problema que por naturaleza podría ser no-lineal.

Uno de los algoritmos de calibración automática más utilizados en la actualidad es **PEST**, un acrónimo de *Parameter Estimation* (Doherty 2005). **PEST** ha sido exitosamente utilizado en numerosos tipos de modelos incluyendo; modelos de aguas subterráneas (Doherty 2005; Christensen & Doherty 2008), modelos hidrológicos (Arabi *et al.* 2007; Immerzeel & Droogers 2008; Bahremand & de Smedt 2010), modelos de humedad de suelo (Tischler *et al.* 2007) y modelos hidráulicos de flujo a presión (Maslia *et al.* 2009). Por estas razones, **PEST** representa la alternativa con mayores ventajas en la calibración de modelos hidrológicos y fue el algoritmo seleccionado en este proyecto para calibrar tanto **SWAT** como **HBV-TEC**.

### **3 OBJETIVOS**

Realizar una evaluación cuantitativa, espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca del Río Agua Caliente mediante la construcción y análisis de balances hídricos orientados a determinar el potencial real de producción hídrico de la cuenca.

#### ***3.1 Objetivos Específicos***

1. Aumentar la red de instrumentación hidrometeorológica y fluviométrica selectiva de la cuenca del Río Agua Caliente con el fin de densificar los registros históricos de información relevante.
2. Generar mapas de uso del suelo en alta resolución para el área de interés con el fin de que reflejen el estado actual de las actividades humanas en la cuenca del Río Agua Caliente.
3. Generar modelos de elevación de terreno en alta resolución que permitan cuantificar aspectos geomorfológicos clave de la cuenca del Río Agua Caliente.
4. Aplicar, calibrar y validar diversos modelos hidrológicos en la cuenca del Río Agua Caliente con el fin de construir el balance hídrico tanto general como a nivel de subcuenca.
5. Discretizar y analizar el balance hídrico de cada subcuenca al tiempo que se determina su grado de afectación sobre los flujos y la disponibilidad hídrica.
6. Definir indicadores de desempeño a nivel de cuenca y subcuenca que permitan describir, evaluar y cuantificar su grado de afectación sobre los flujos y la disponibilidad hídrica.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Objetivo 1. Instrumentación de campo

En relación a este objetivo, se instalaron 3 estaciones meteorológicas DAVIS-Vintage PRO-2, (ANEXO 1) localizadas en el campus central del ITCR, Llano Grande y Barrancas del Guarco (Figura 1). La selección final de los sitios de instalación, dependió en buena medida de la ubicación estratégica y de seguridad de los equipos en sí, principalmente robo o vandalismo. Afortunadamente, no se tuvieron situaciones de esa índole durante toda la ejecución del proyecto. Todas las estaciones DAVIS estuvieron dotadas con *data-loggers* que registraban variables meteorológicas de forma horaria (*temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión atmosférica, radiación visible, radiación ultravioleta y humedad de suelo*). La selección de resolución temporal horaria se dio básicamente como limitante de la capacidad de memoria de los *data-loggers*, a mayor resolución temporal, mayor la frecuencia de recolección de datos y por lo tanto más complicado desde el punto de vista logístico.

En relación a las estaciones fluviométricas, se instalarán sensores de nivel HOBO U-20 y U-30 (ANEXO 2) en los Ríos Agua Caliente (*represa de JASEC*), Toyogres (*Linda Vista S.A*) y Purires (*Linda Vista S.A*) (Cuadro 1). Dos sensores HOBO fueron instalados en cada sitio, uno sumergido, el cual registra presión total, y otro expuesto, el cual registra presión barométrica. Estos sensores fueron ajustados para realizar mediciones con una resolución temporal de 10 min. Dado que estos sensores miden nivel (*y temperatura*) no así flujos, varias campañas de medición de velocidad se realizaron a lo largo de todo el proyecto.

La velocidad y por ende el caudal, debieron ser medidos puntualmente *in-situ* con un correntómetro. Para ello, se adquirió un correntómetro digital tipo USGS, (ANEXO 3) con todos los equipos y accesorios necesarios para garantizar el mínimo grado de seguridad ligado a la toma de datos durante crecidas y eventos fuertes de precipitación. Este correntómetro fue utilizado para inferir caudal en los cauces antes mencionados.

En cuanto a la lectura de datos, y dado que los *data-loggers*, tanto de los sensores HOBO como los de las estaciones DAVIS, poseen suficiente memoria para registrar continuamente durante 90 días; la periodicidad de recolección de datos varió de 6 a 8 semanas. En ambos casos, los formatos de información son de carácter binario (*formato propietario*) y debieron ser transformados a formato ASCII a través de sus respectivos softwares.

Cuadro 1. Posición de la red de instrumentación hidrometeorológica y fluviométrica

Punto	ID	Tipo	Este (m)	Norte (m)
1	Campus ITCR	EST.DAVIS	509466	1090125
2	Barrancas	EST.DAVIS	503370	1088474
3	Llano Grande	EST.DAVIS	510279	1095409
4	Represa.JASEC	S.HOBO	510101	1087535
5	Rio.Toyogres	S.HOBO	510431	1087992
6	Rio.Purires	S.HOBO	504208	1088525

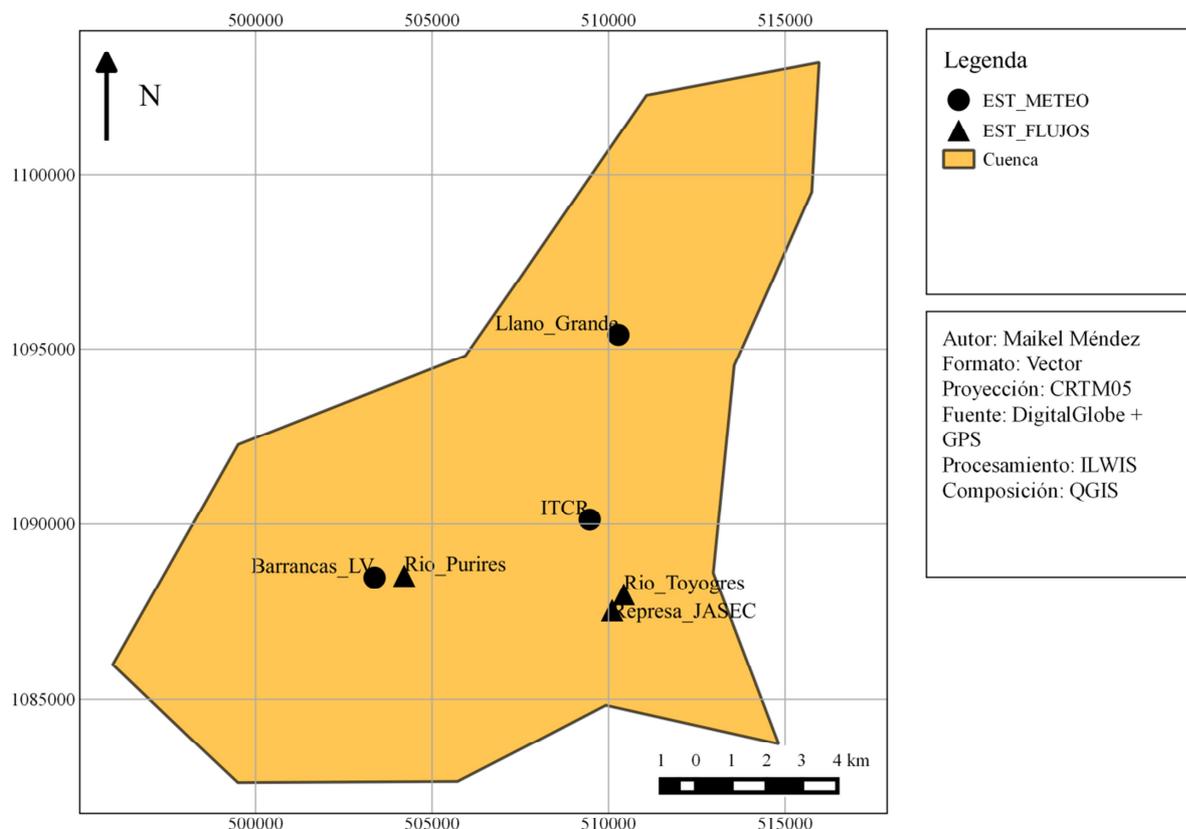


Figura 1. Posición de la red de instrumentación hidrometeorológica y fluviométrica en relación a la cuenca del río Agua Caliente. Las estaciones meteorológicas se marcan con círculos mientras que las estaciones fluviométricas se marcan con triángulos.

## 4.2 Objetivo 2. Mapas de uso del suelo

### 4.2.1 Verificación del nivel de georeferenciación

Imágenes multiespectrales del satélite WorldView-II (11-bits) tomadas durante 2011 (2011-06-30) fueron utilizadas para generar mapas de uso del suelo para la cuenca del río Agua Caliente (ANEXO 4). Un bloque de cuatro imágenes y cuatro bandas del satélite WorldView-II (Red, Blue, Green, near-IR) con resolución de 2.4 x 2.4 m fueron utilizadas en un esquema de clasificación no-supervisada (Figura 2). Previo a la clasificación, el bloque de imágenes del WorldView-II fue geoméricamente corregido con base en un modelo de elevación digital (DEM) y puntos de control en terreno (GCPs) provenientes del proceso de aerotriangulación analítica digital (AAD) de las imágenes estéreo del satélite WorldView-I (refiérase a metodología del objetivo 3). No se consideró necesario aplicar ningún modelo de corrección atmosférica, ya que solo se analizó un único espacio temporal (2011). Según los metadatos suministrados, el porcentaje de nubes en el bloque de imágenes, alcanzó un 11.15 %, las cuales se concentran en la esquina noroeste de la georeferencia.

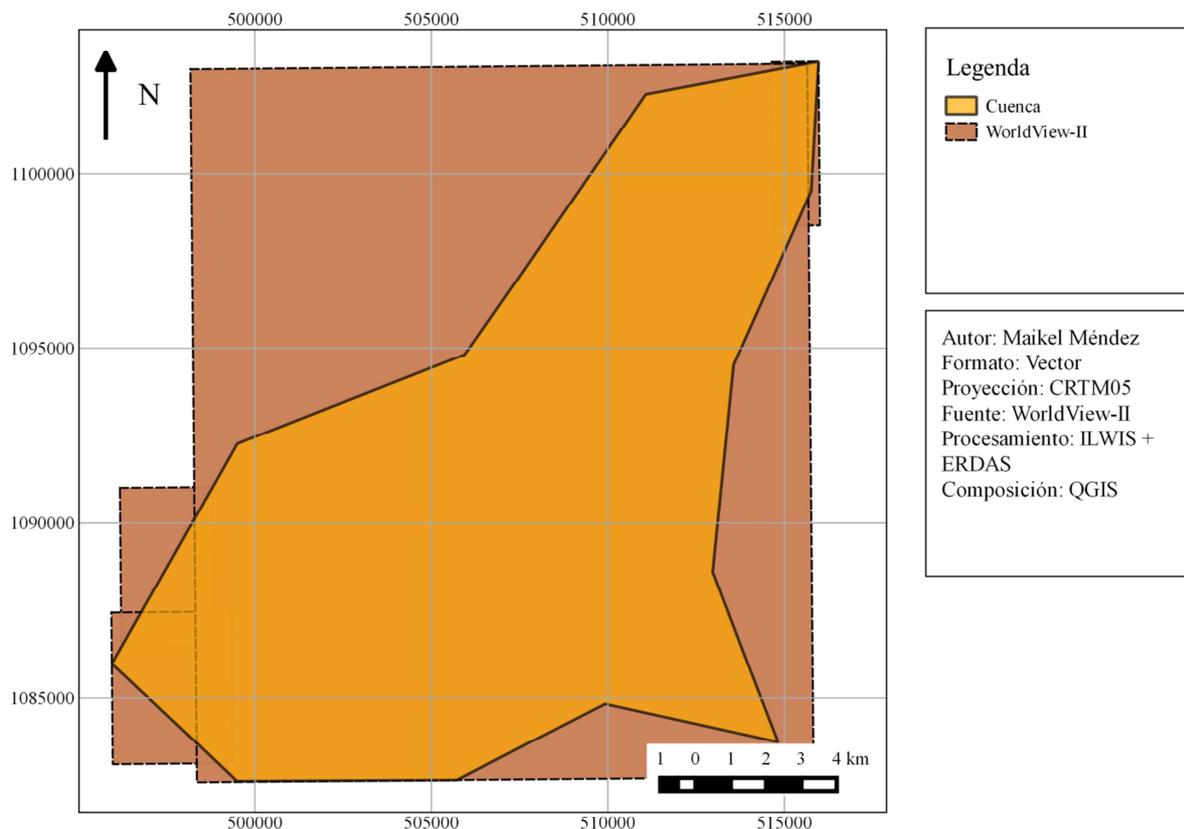


Figura 2. Bloque de imágenes multiespectrales WorldView-II (*polígonos en marrón*) utilizadas en la Cuenca del río Aguacaliente (*polígono en naranja*).

#### 4.2.1 Aplicación de algoritmos de clasificación espectral

El GIS ILWIS, fue utilizado para llevar a cabo el proceso de clasificación no supervisada (*clustering*). La decisión de utilizar un esquema no-supervisado se tomó basada en el hecho de que tanto **HBV-TEC** como **SWAT** son modelos semi-distribuidos y que incluyen relativamente pocas clases de usos de suelo. En la primera fase de la operación de clasificación ([Figura 3](#)), se calcula un histograma multi-dimensional de las bandas de entrada (*4 en este caso*), el cual es una representación de los espacios característicos (*feature space*) de las firmas espectrales de cada superficie característica (*kernel de 3 x 3 pixeles*). Posteriormente, los espacios característicos son divididos en diversos compartimentos hasta alcanzar la cantidad de clústeres deseados. Varios experimentos fueron realizados hasta alcanzar la cantidad de clústeres deseados, en virtud de las características de los modelos hidrológicos. Se utilizaron los algoritmos de Standard Color Composites (*SCC*) y Dynamic Color Composites (*DCC*). En consecuencia, se eligió un mapa de clasificación con seis clústeres o clases, incluyendo bosque, suelo desnudo (*o en preparación*), pastoreo, cultivo, urbano y nubes. Posteriormente, se procedió a remuestrear el mapa final de clasificación a una resolución de 10 x 10 m. Lo anterior, con el propósito de que todos los mapas tuviesen la misma resolución espacial y la misma georeferencia (*tanto horizontal como vertical*).

En cuanto a los mapas de tipos de suelo, se utilizó el mapa de suelos 1:200000 preparado por el Centro Científico Tropical (CCT) de 1989. Este mapa, está clasificado en base a las clases establecidas por la FAO. Dado que el formato original de este mapa es de tipo vectorial (*formato ArcInfo*), el mismo tuvo que ser rasterizado y su resolución ajustada a 10 x 10 m. Este mapa, representa el producto de menor resolución espacial y mayor incertidumbre del total de los datos espaciales.

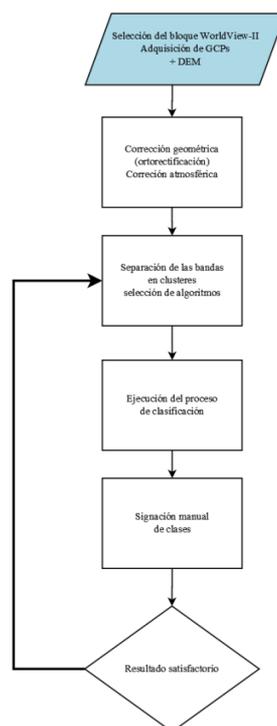


Figura 3. Diagrama de flujo para la generación de mapas de uso del suelo.

### 4.3 Objetivo 3. Modelos de elevación de terreno

Haciendo uso de imágenes estereoscópicas del satélite WorldView-I tomadas durante 2011 (18/08/2011), se generaron modelos de elevación digital (DEM) y demás productos necesarios para el análisis cuantitativo de los procesos hidrológicos en la cuenca del Río Agua Caliente (ANEXO 5). ERDAS-LPS fue el software utilizado para generar los modelos de elevación digital. El GIS ILWIS se utilizó en labores de hidroprocesamiento.

#### 4.3.1 Parámetros cartográficos

El sistema de proyección cartográfica utilizado, corresponde al Costa Rica Transversal de Mercator, CRTM05 definido por la Unidad Ejecutora del Catastro Nacional de Costa Rica (IGN 2008), sus parámetros son los siguientes:

- Proyección: Transversal Mercator (Gauss Kruger)
- Falso este: 500000
- Falso norte: 0.0000
- Meridiano central: -84.00000 (84.000 W)
- Factor de escala: 0.9999000
- Latitud de origen: 0.00000
- Unidades: Metros
- Datum: WGS 1984

Para la referencia vertical de los puntos, se tienen en cuenta las diferencias verticales de los puntos o elevaciones elipsoidales sobre el sistema GPS obtenidas de los ajustes de observaciones sobre el elipsoide WGS-84. A las elevaciones elipsoidales se les aplicó el modelo regional de ondulación CARIB-97, obteniendo así las elevaciones ortométricas.

#### 4.3.2 Orientación externa

Un total de 42 puntos de control en terreno (*GCPs*) fueron utilizados para respaldar la orientación externa de las imágenes WorldView-I ([ANEXO 6](#)). El objetivo primordial de los *GCPs* es establecer la relación entre el sistema de coordenadas de la proyección cartográfica (*CRTM05*) y el sistema de coordenadas de las imágenes (*a nivel de pixel*). 23 puntos fueron referidos al estudio realizado por la empresa BLOM para PRUGRAM ([PRUGAM 2008](#)), mientras que los restantes 19 puntos fueron tomados localmente ([Figura 4](#)). En ambos casos, se utilizaron dispositivos GPS diferenciales de la marca TRIMBLE modelos 5700 y R3 respectivamente ([ANEXO 7](#)). Los protocolos de tomas de datos utilizados se apegaron a las recomendaciones del fabricante, de manera tal que los *GCPs* fueron levantados en locaciones claramente identificables. Cada toma de *GCPs* contó con una exposición del al menos 30 minutos y fueron procesados mediante el software TRIMBLE Business Center. Cada *GCPs* representa un punto de control total ( $X, Y, Z$ ) y cuenta con su respectivo informe que respalda la calidad de cada punto. La selección de los puntos tomados por el ITCR se ejecutó pensando en la mayor cantidad de puntos por en el área de traslape de las imágenes estéreo. Con estos equipos, se consiguieron precisiones de 10 mm. + 0.5 ppm en levantamiento estático, modalidad utilizada en todos los puntos.

#### 4.3.3 Aerotriangulación analítica digital (AAD)

El proceso de aerotriangulación busca asociar física y matemáticamente las imágenes individuales disponibles (imágenes estéreo en este caso) y las amarra a un bloque único utilizando como referencia los datums horizontales y verticales de referencia. El software utilizado para este estudio fue ERDAS Imagine-LPS de Leica Photogrammetric. El modelo matemático utilizado fue el de funciones racionales (*RPC*), el cual establece una correlación entre los píxeles de la imagen y su posición en el terreno partir del principio del parallax.

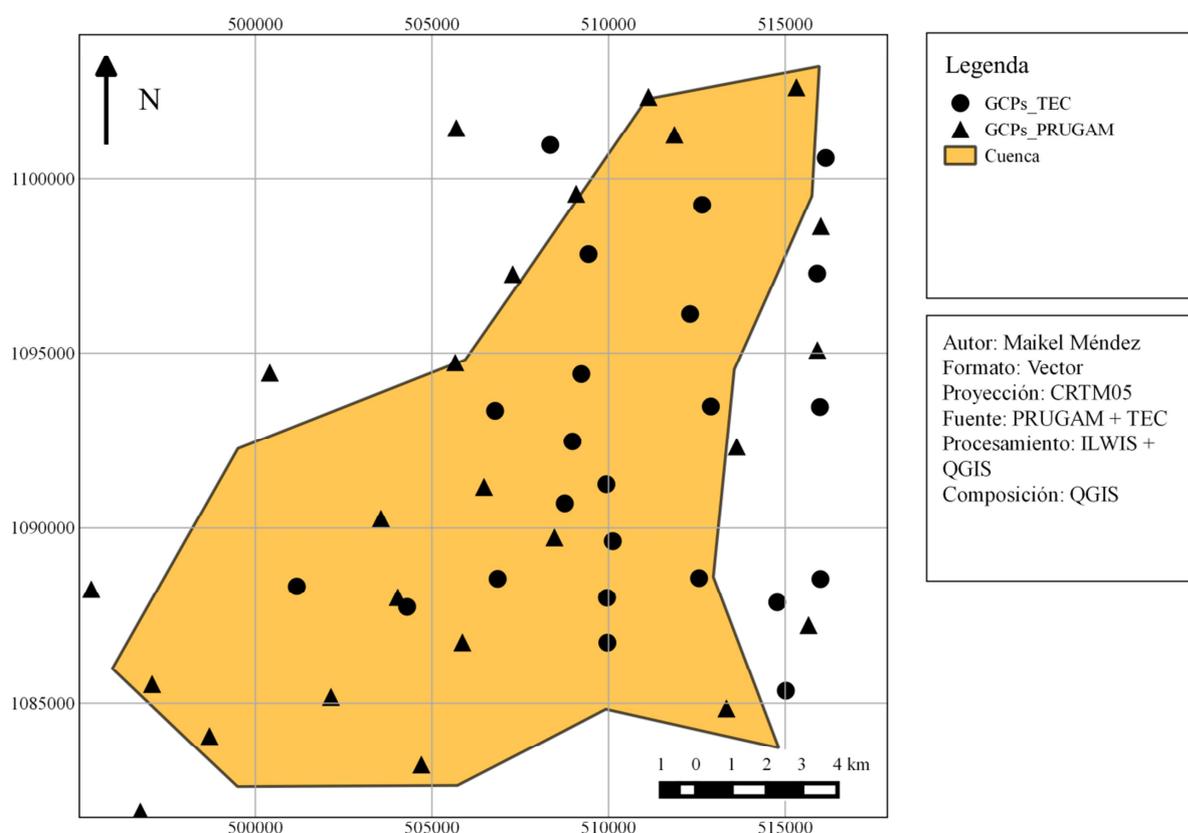


Figura 4. Ubicación de los GCPs sobre el área de terreno. Cuenca del río Aguacaliente

Las diferencias medidas en base al parallax en un esquema pixel-pixel en imágenes estéreo, son convertidas a elevaciones absolutas utilizando funciones trigonométricas y la información de orientación interna del sensor orbital. ERDAS-LPS utiliza un algoritmo único de correlación automática que se encarga de definir cuantos puntos de amarre (*Tie Points*) sean necesarios. El resultado de la ADD es una orientación exterior para cada imagen en una localización X, Y, Z. Finalmente, un ajuste en bloque fue ejecutado utilizando ERDAS-LPS para calcular las coordenadas para cada punto de amarre (*Tie Points*) y determinar con precisión los parámetros de la orientación externa para cada imagen satelital. Los parámetros de la orientación externa fueron utilizados en la orientación de los estéreo modelos y son igualmente usados como datos de entrada en los procesos de ortorectificación y compilación altimétrica. El ajuste del bloque permitió verificar la calidad de todos los puntos de control utilizados en la AAD. Aquellos puntos con mayor error se ajustaron o eliminaron de acuerdo a la calidad obtenida de la función de costo seleccionada, en este caso el RMSE (*Root Mean Square Error*).

#### 4.3.4 Orientación interna

Dos bloques de imágenes estéreo del satélite WorldView-I fueron utilizadas para extraer los DEMs a partir del proceso ADD para el área en estudio (Figura 5).

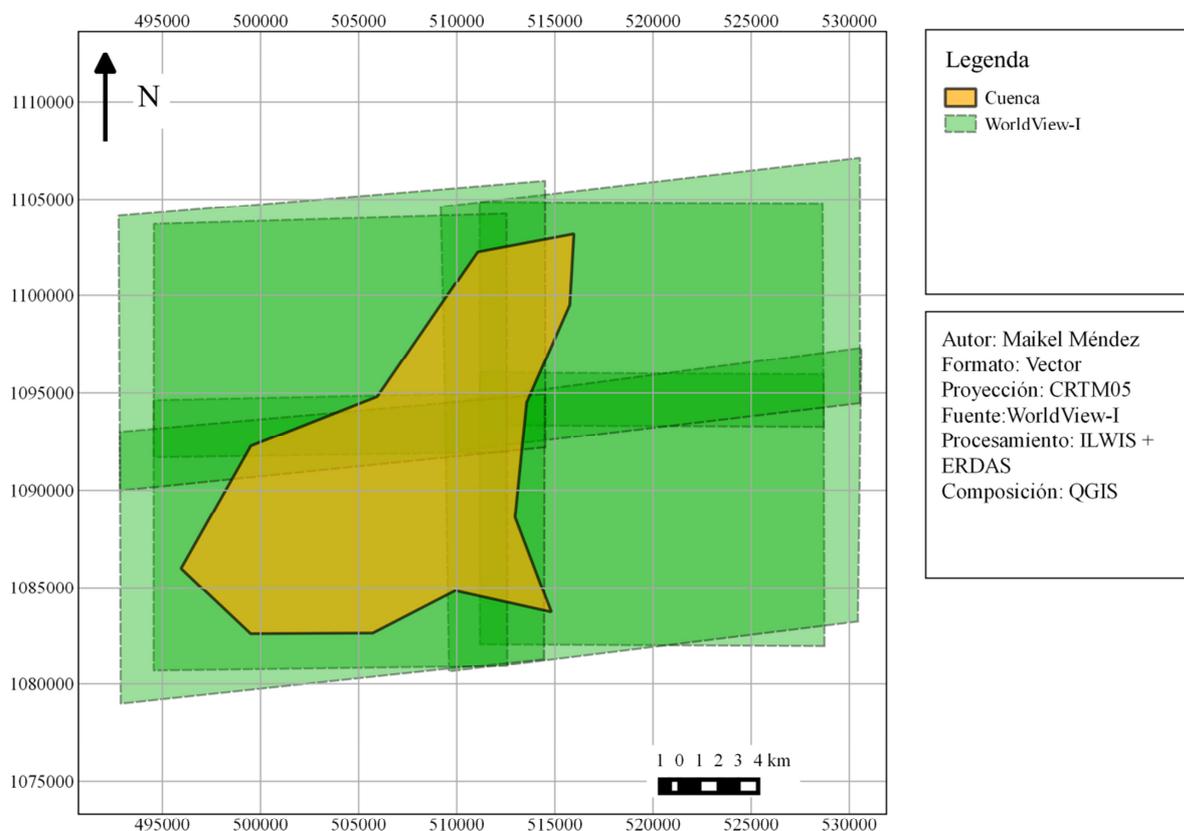


Figura 5. Bloque de imágenes estéreo del satélite WorldView-I (*polígonos en verde*) utilizadas en la Cuenca del río Aguacaliente (*polígono en naranja*).

Estas imágenes fueron tomadas con fecha 18/08/2011 con una resolución de 0.5 x 0.5 m. Los metadatos y demás parámetros de calibración (incluyendo puntos fiduciales y distancias focales) fueron extraídos de los archivos ASCII incluidos en cada imagen. Tales parámetros fueron incluidos en ERDAS-LPS para definir la orientación interna del sensor.

#### 4.3.5 Generación de modelos de elevación digital (DEMs)

Una vez concluidos los procesos de orientación interna, externa y ADD, la ortorectificación de las imágenes estéreo, se generó una red irregular de triángulos (*TIN*) a partir del DEM para producir una mayor calidad y continuidad en la rectificación de las imágenes. Posteriormente, se generó una nube de puntos en ERDAS-LPS para toda el área de estudio (Figura 5). Cada uno de éstos puntos contiene información precisa en X, Y, Z que fueron luego utilizados para generar curvas de nivel a cada 5.0 m. Dichas curvas de nivel, fueron generadas mediante el GIS ILWIS utilizando el proceso de interpolación del inverso del cuadrado de la distancia (*Inverse Distance Function*) con una potencia de factor 2. Finalmente, con las curvas de nivel a cada 5.0 m se produjo un DEM con resolución de 10 x 10 m.

Dado que tanto HBV-TEC como SWAT son de carácter semi-distribuido, no se consideró necesario aumentar la resolución espacial del DEM. La Figura 6 resume las actividades realizadas alrededor de las imágenes WorldView-1 para la producción final de los DEMs.

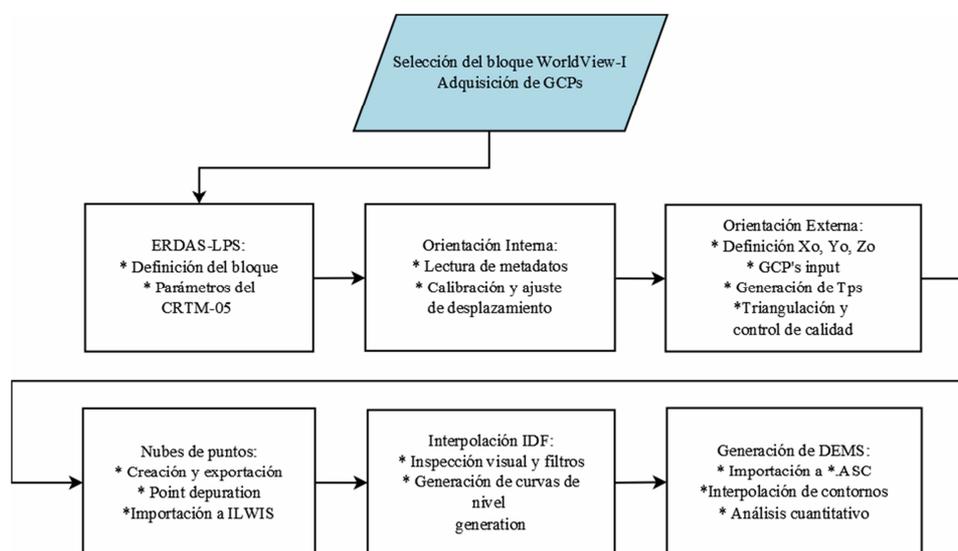


Figura 6. Diagrama de flujo para la generación de modelos de elevación digital (DEMs).

#### 4.3.6 Control de calidad

El control de calidad de los DEMs, se realizó de forma cuantitativa mediante la aplicación de la función-objetivo Raíz del Error Cuadrático Medio o (RMSE). El RMSE (ec. (1)) fue utilizado para evaluar la desviación entre los GCPs (observaciones) contra los valores de elevación de cada DEM derivado a partir de la nube de puntos generada por ERDAS-LPS.

$$\text{RMSE} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{n} \right)^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

Donde;  $n$  representa el número total de observaciones, [-];  $O_i$  es el valor observado en el intervalo  $i$ , [-]; y  $M_i$  es el valor modelado en el intervalo  $i$ , [-].

#### 4.3.7 Hidroprocesamiento

Las labores de hidroprocesamiento, buscan caracterizar físicamente la cuenca con especial énfasis en los atributos que tienen mayor importancia en términos de modelización hidrológica. A partir del DEM con resolución de 10 x 10 m, se procedió a utilizar el toolbox de

hidroprocesamiento de ILWIS GIS. El objetivo principal, es la extracción de la red hidrológica y la determinación del número de subcuencas que integran la cuenca del río Agua Caliente. Las subcuencas son definidas como la unidad de discretización básica de una cuenca hidrológica. El diagrama de flujo mostrado por la Figura 7 resume las actividades secuenciales alrededor del hidroprocesamiento para entidades raster.

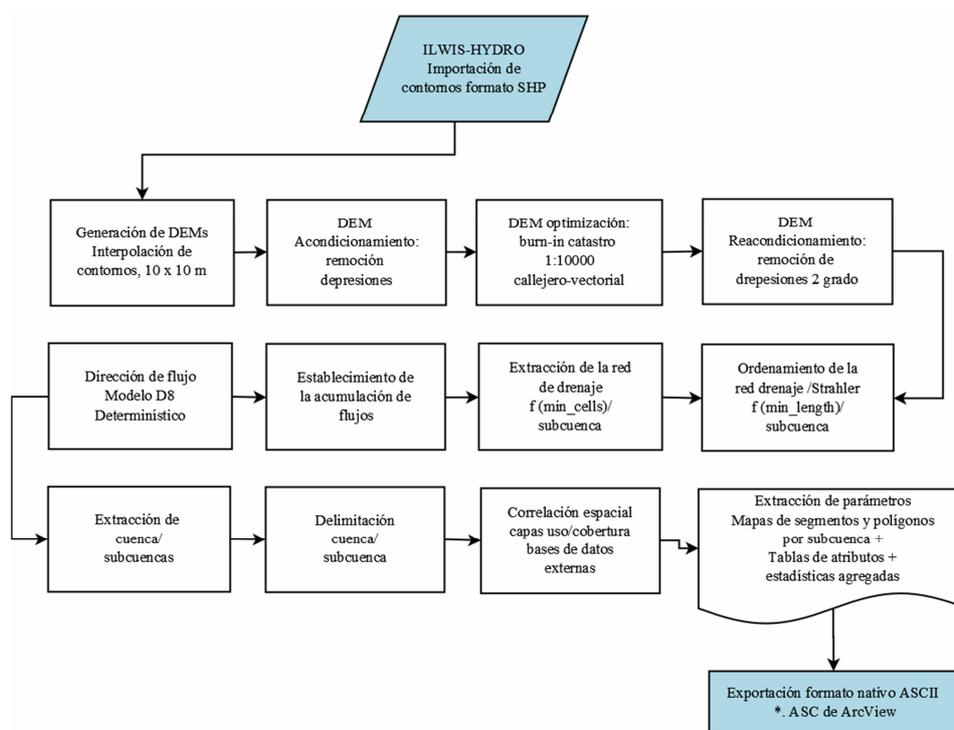


Figura 7. Diagrama de flujo ligado a las funciones de hidroprocesamiento.

La dirección de flujo se determinó utilizando el método determinístico D8 de la máxima pendiente mientras que la acumulación de flujo y el orden de la red de drenaje obedeció el criterio de Strahler. Para lo anterior, se incluye el acondicionamiento de los diferentes DEMs mediante la aplicación de un algoritmo de remoción de depresiones que asegura la conectividad hidráulica a lo largo de la superficie del DEM. Dado que parte del área de estudio está ocupado por uso netamente urbano, un mapa de callejeros a escala 1:10 000 fue “quemado” (burned-in) sobre los DEMs ya optimizados.

El objetivo de este quemado, fue forzar al algoritmo para que la dirección y acumulación de flujo obedeciese de una forma representativa las líneas de flujo preferenciales, que las calles representan sobre la conducción y canalización de la escorrentía superficial. De esa manera, las condiciones de frontera y la delimitación espacial de las subcuencas, fue por demás representativa.

## 4.4 Objetivo 4. Modelos hidrológicos

### 4.4.1 El modelo HBV-TEC

El modelo **HBV-TEC** (Méndez & Calvo, 2015), es un rediseño del modelo hidrológico **HBV** (Bergström 1973; Bergström 1995; Lindström *et al.* 1997) desarrollado utilizando el lenguaje de programación **R** (R Core Team, 2015). Similar a la versión original, el HBV-TEC es un modelo hidrológico conceptual semi-distribuido para el cálculo continuo de escorrentía (Figura 8).

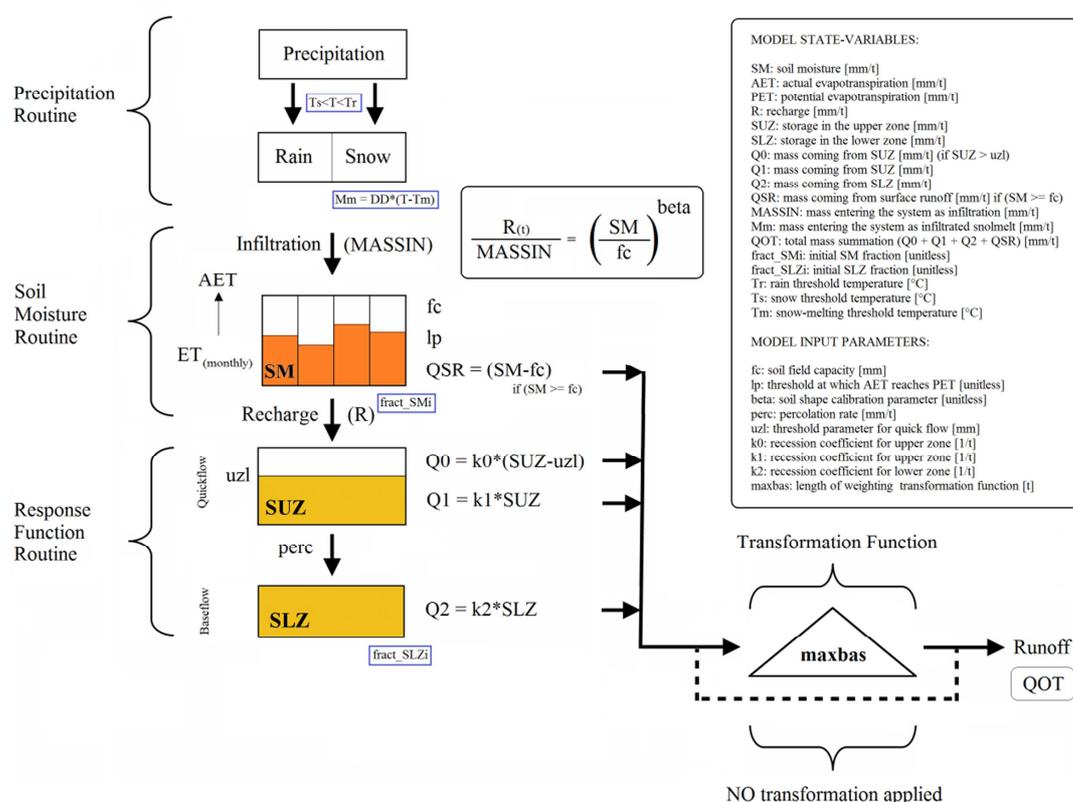


Figura 8. Estructura del modelo hidrológico **HBV-TEC**. Los parámetros de entrada y las variables de estado se indican.

El concepto básico, es que la descarga está relacionada al almacenamiento a través de ecuaciones de conservación de masa y una rutina de transformación. La respuesta hidrológica, es fácilmente modelada gracias al uso de datos totalitarios (*lumped*) o semi-distribuidos, aunado a una representación conceptual de los procesos que gobiernan el flujo. La estructura del **HBV-TEC** consiste de rutinas para la precipitación, humedad de suelo, funciones de respuesta y funciones de transformación. El modelo puede ser utilizado en resoluciones temporales diarias u horarias. Los datos de entrada del mismo, son registros de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Estos últimos en intervalos mensuales medidos a lo largo de un lapso de tiempo extenso. El balance de masas general que resuelve el modelo **HBV-TEC** (Figura 8) puede ser descrito como:

$$P - AET - QOT = \frac{d}{dt} [SP + SM + SUZ + SLZ + LAKES] \dots\dots\dots(2)$$

Donde;  $P$  representa la precipitación (*lluvia o nieve*),  $AET$  es la evapotranspiración real,  $QOT$  es la escorrentía,  $SP$  es la acumulación de nieve,  $SM$  es humedad en el perfil no-saturado del suelo,  $SUZ$  es el almacenamiento en la zona superior,  $SLZ$  almacenamiento en la zona inferior y  $LAKES$  representa en volumen almacenado en lagos.

#### 4.4.1.1 Rutina de precipitación

La rutina precipitación, representa ya sea lluvia o nieve. En el caso de precipitación, ésta es utilizada directamente como entrada de infiltración ( $MASSIN$ ). En el caso de nieve, ésta puede ser acumulada o fundida en términos de precipitación efectiva (y *posteriormente infiltrada*) dependiendo del umbral de temperatura  $T_t$  (Figura 9). El parámetro día-grado ( $DD$ ) indica una disminución en el contenido de agua de la capa de nieve causada por el incremento de  $1^\circ\text{C}$  por del umbral de congelación establecido por intervalo de tiempo de acuerdo a:

$$S_{melt} = DD \cdot (T_i - T_t) \dots\dots\dots(3)$$

Donde;  $S_{melt}$  representa la contribución a la infiltración ( $MASSIN$ ) proveniente de la fusión de nieve,  $DD$  es el parámetro día-grado,  $T_t$  es el umbral de temperatura y  $T_i$  es la temperatura en el intervalo temporal correspondiente.

La rutina de humedad de suelo, controla los cambios de humedad en el perfil no-saturado del suelo ( $SM$ ); el cual es función de la infiltración ( $MASSIN$ ) proveniente de la rutina de precipitación. Los cambios en  $SM$  son controlados por los parámetros  $fc$  (*capacidad de campo del suelo*),  $lp$  (*umbral en el cual AET alcanza PET*) y  $beta$  (*parámetro de calibración de forma*) de acuerdo a:

$$\frac{R_{(t)}}{MASSIN_{(t)}} = \left( \frac{SM_{(t)}}{fc} \right)^{beta} \dots\dots\dots(4)$$

Si la humedad del suelo ( $SM$ ) en un intervalo de tiempo dado es mayor o igual a la capacidad de campo ( $fc$ ), entonces se calcula una componente de escorrentía directa dentro del balance de masas ( $QSR$ ), la cual es directamente dirigida a la función de transformación de acuerdo a:

$$QSR = (SM - fc) \dots\dots\dots(5)$$

#### 4.4.1.2 Rutina de humedad de suelo

Por otro lado,  $SM$  es también compensado por pérdidas producidas por la evapotranspiración real ( $AET$ ). Aquella infiltración ( $MASSIN$ ) que no pueda ser almacenada, evapotranspirada o transformada, es utilizada como entrada en la rutina de función de respuesta y representada por el parámetro  $R$  (*recarga*), tal y como lo muestra la Figura 10.

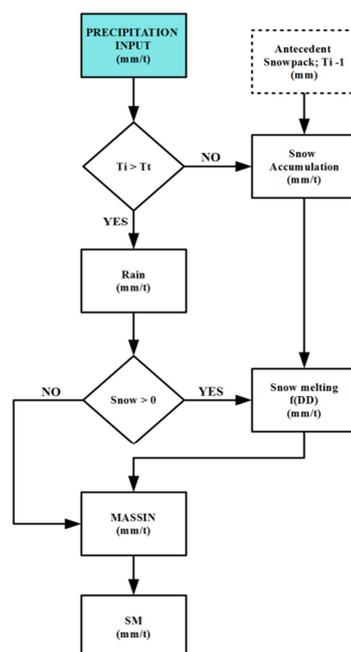


Figura 9. Fluxograma del cálculo de  $S_{melt}$  dentro del modelo HBV-TEC.

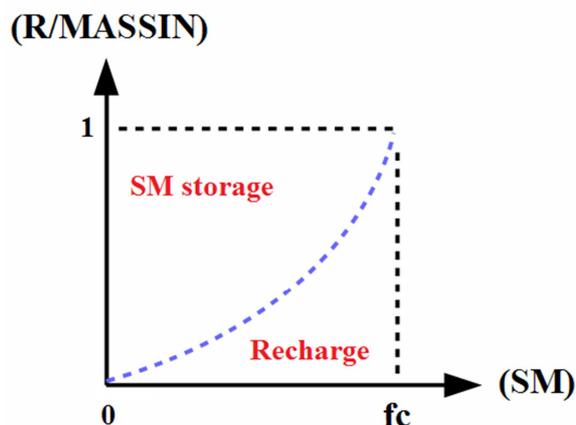


Figura 10. Razón de cambio entre precipitación y recarga para el modelo HBV-TEC.

La variable de estado  $fract\_SMi$  (fracción inicial de  $SM$ ) puede ser introducida al modelo por el usuario o calculada con base en un periodo de calentamiento definido.

#### 4.4.1.3 Función de respuesta

La rutina de función de respuesta, la cual recibe recarga ( $R$ ) de la rutina de humedad de suelo ( $SM$ ) está compuesta de dos reservorios;  $SUZ$  (almacenamiento en la zona superior) y  $SLZ$  (almacenamiento en la zona inferior); los cuales a su vez, representan las componentes de flujo rápido y flujo base respectivamente. Las contribuciones de flujo desde  $SUZ$ , salen de la zona superior a través de posibles rutas;  $Q0$ , el cual describe una relación de descarga lineal

controlada por el coeficiente de recesión  $k0$  (en el tanto que el umbral  $uzl$  sea excedido);  $Q1$ , que también describe una relación de descarga lineal controlada por el coeficiente de recesión  $k1$  (en el tanto que el umbral  $uzl$  no sea excedido) y una constante de percolación controlada por el parámetro  $perc$ . La contribución desde el compartimento del flujo base ( $SLZ$ ), son determinadas por  $prec$ , quien a su vez proviene de  $SUZ$  y que es controlada por el coeficiente de recesión  $k2$ , la cual determina la tasa de entrega de  $Q2$  (Figura 11). De la misma forma, La variable de estado  $fract\_SLZi$  (fracción inicial de  $SLZ$ ) puede ser introducida al modelo por el usuario o calculada con base en un periodo de calentamiento definido.  $QOT$  o escorrentía, la cual representa la sumatoria de las diferentes componentes del balance de masa ( $QSR + Q0 + Q1 + Q2$ ) es finalmente conducida hasta la función de transformación.

#### 4.4.1.4 Función de transformación

La escorrentía total ( $QOT$ ) generada por la función de respuesta es ruteada a través de la función de transformación con el propósito de distribuir adecuada la descarga de la cuenca en el tiempo, derivándose así la geometría apropiada del hidrograma de la misma. El parámetro de distribución de peso ( $maxbas$ ), controla la extensión de la base de la función de transformación (por peso relativo) que a su vez representa la duración ( $length$ ) de la función de transformación per se. Si el usuario determina que no se aplique transformación alguna, el flujo total del sistema será entonces igual a  $QOT$ .

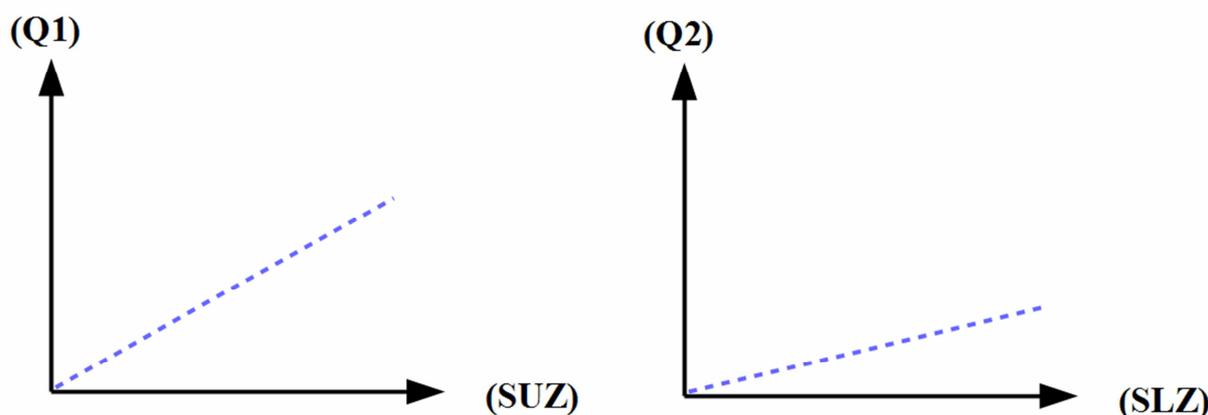


Figura 11. Componentes de la función de respuesta, almacenamiento en la zona superior ( $SUZ$ ) y almacenamiento en la zona inferior ( $SLZ$ ) para el modelo HBV-TEC.

#### 4.4.1.5 Paquetes y funciones en R

Los paquetes de **R** más relevantes en el desarrollo del modelo **HBV-TEC** incluyen: *base*, *DescTools*, *doParallel*, *dplyr*, *foreach*, *ggplot2*, *grid*, *gridExtra*, *gstat*, *lubridate*, *MASS*, *pastecs*, *plyr*, *RColorBrewer*, *reshape* y *visreg*. Se utilizaron igualmente las interfaces gráficas (IDEs) RStudio, TinnR, JGR y Deducer.

#### 4.4.1.6 Funciones objetivo y estadísticas de desempeño

El desempeño de los modelos **HBV-TEC** y **SWAT**, se evaluó de acuerdo a las siguientes funciones objetivo:

- **NSeff** (*Nash and Sutcliffe efficiency criterion expresado como fracción*)

$$NS_{eff} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})^2} \dots\dots\dots(6)$$

- **LNNSeff** (*Nash and Sutcliffe efficiency with logarithmic values expresado como fracción*)

$$LNNS_{eff} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (LNQ_i^{obs} - LNQ_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (LNQ_i^{obs} - LN\bar{Q}_i^{obs})^2} \dots\dots\dots(7)$$

- **PBIAS** (*Percent Bias expresado como porcentaje*)

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{mod}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \dots\dots\dots(8)$$

- **APB** (*Absolute Percent Bias expresado como porcentaje*)

$$APB = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i^{obs} - Q_i^{mod}|}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \dots\dots\dots(9)$$

Donde;  $i$  es el intervalo temporal,  $n$  es el la duración (*longitud*) del periodo de modelación,  $Q$  es el caudal and índices *obs* y *mod* se refieren a los valores observados y modelados respectivamente.

El **NSeff** es un parámetro estadístico de eficiencia global que determina la magnitud relativa de la varianza de los residuales (*respecto del modelo ajustado*) en comparación a la varianza de las observaciones en relación a su valor medio. Por otro lado, el **LNNSeff** tiene por objetivo compensar la sensibilidad inherente del **NSeff** a valores extremos, ya sean picos o valores muy bajos de caudal. Lo anterior, se logra a través de la transformación logarítmica de las varianzas.

El **APB** es una medida de sincronía temporal (*timing*) entre los valores observados y los modelados y generalmente se usa en conjunto con el **PBIAS**, el cual representa una medida de balance de masas. Un desfase temporal importante entre los datos observados y simulados, podría ser sugerido por un **PBIAS** bajo y un **APB** alto. Diferente interpretaciones y límites sobre

estas funciones objetivo pueden ser encontradas en la literatura (Beven & Binley 1992; Gupta *et al.* 1999; Krause *et al.* 2005; Moriasi *et al.* 2007). Para efectos de este proyecto, valores de  $NSeff \geq 0.80$ ,  $LNNSeff \geq 0.80$ ,  $PBIAS \leq \pm 5\%$  and  $APB \leq 20\%$ , son considerados satisfactorios.

#### 4.4.1.7 Estructura de archivos en HBV-TEC

Gracias a **HBV-TEC** en **R**, la estructura de los archivos de entrada y salida es relativamente sencilla. A continuación, se detallan los archivos de entrada:

- hbvtecpq.txt: archivo \*. TXT TAB-limited que incluye variables; DATE (*fecha*), PREC (*precipitación en mm/t*), TEMP (*temperatura en Celsius*) y QOBS (*caudal observado en mm/t*). Resolución temporal diaria u horaria.
- hbvtecpa.txt: archivo \*. TXT TAB-limited que incluye parámetros; fc, lp, beta, perc, uzl, k0, k1, k2 y maxbas. Resolución temporal diaria u horaria.
- hbvteceva.txt: archivo \*. TXT TAB-limited que incluye valores mensuales promedio de PET (*evapotranspiración potencial en mm/hora o mm/día*).
- hbvtecatr.txt: archivo \*. TXT TAB-limited que incluye atributos; WatershedArea (*área de la cuenca en km<sup>2</sup>*), fract\_SMinitial (*fracción inicial de SM, 0-1*), fract\_SLZinitial (*fracción inicial de SLZ, 0-1*), time\_resolution (*resolución temporal, 1 diario, 0 horario*), routing (*ruteo hidráulico, 0 maxbas, 1 no-transformación*). Este archivo se alimenta de los atributos generados en la etapa de hidroprocesamiento, los cuales son generalmente guardados en formato \*.SHP de ArcView. En consecuencia, variedad de herramientas GIS pueden ser utilizadas para crear este archivo (*por ejemplo ILWIS, SAGA, GRASS, QGIS, R, PYTHON, etc.*).

A continuación, se detallan los archivos de salida numéricos:

- hbvtecout\_hbv.csv: \*.CSV comma-limited que incluye las siguientes salidas (todas en mm/t): outQOBS (*caudal observado en mm/t*), outPREC (*precipitación en mm/t*), outTEMP (*temperatura en Celsius*), outPET (*evapotranspiración potencial en mm/t*), outAET (*evapotranspiración real en mm/t*), outMASSIN (*entrada de infiltración en mm/t*), outRstore (*masa acumulada en el perfil no saturado SM en el intervalo t en mm/t*), outSM (*humedad de suelo en el intervalo t en mm/t*), outR (*recarga en el intervalo t en mm/t*), outSUZ (*salida de masa de la zona superior en el intervalo t en mm/t*), outSLZ (*salida de masa de la zona inferior en el intervalo t en mm/t*), outDELTAMASS (*delta de masa entre la entrada y salida del sistema en el intervalo t en mm/t*), outQSR (*componente de escorrentía directa en el intervalo t en mm/t*), outQ0 (*componente de escorrentía en la zona superior en el intervalo t en mm/t*), outQ1 (*componente de escorrentía en la zona superior en el intervalo t en mm/t*), outQ2 (*componente de escorrentía en la zona inferior en el intervalo t en mm/t*), outQOT (*escorrentía total en el intervalo t en mm/t*), outQSIM (*caudal total simulado en el intervalo t en mm/t*), outQRES (*residual entre el caudal total simulado y el caudal observado en el intervalo t en mm/t*) y outQSIM3 (*caudal total simulado en el intervalo t en m<sup>3</sup>/s*).
- hbvtecout\_desc\_hbv.csv: \*.CSV comma-limited que incluye las siguientes salidas estadísticas descriptivas para el archivo hbvtecout\_hbv.csv; nbr.val (*número de*

*observaciones*), *nbr.null* (*número de valores nulos*), *nbr.na* (*número de datos no disponibles*), *min* (*mínimo*), *max* (*máximo*), *range* (*rango*), *sum* (*suma*), *median* (*mediana*), *mean* (*media*), *SE.mean* (*error estándar sobre la media*), *CI.mean.0.95* (*intervalos de confianza sobre la media al 95%*), *var* (*varianza*), *std.dev* (*desviación estándar*) y *coef.var* (*coeficiente de variación*).

- *hbvtectq\_desc\_hbv.csv*: \*.CSV comma-limited, ídem de las estadísticas descriptivas pero para el archivo *hbvtectq.txt*.
- *hbvtectsim.csv*: \*.CSV comma-limited, ídem del archivo *hbvtectout\_hbv.csv* pero que incluye únicamente *outQSIM* (*caudal total simulado en el intervalo t en mm/t*). Lo anterior, para efecto de optimización con **PEST**.
- *hbvtecteff.csv*: \*.CSV comma-limited que incluye resultados de eficiencia en las siguientes funciones objetivo; *NSeff* (*Nash and Sutcliffe efficiency criterion expresado como fracción*), *LNNSeff* (*Nash and Sutcliffe efficiency with logarithmic values expresado como fracción*), *R2* (*coeficiente de correlación al cuadrado expresado como fracción*), *PBIAS* (*Percent Bias expresado como porcentaje*), *APB* (*Absolute Percent Bias expresado como porcentaje*).

A continuación, se detallan los archivos de salida gráficos:

- *gghbvtec01.png*: Boxplot de precipitación (por mes).
- *gghbvtec02.png*: Boxplot de precipitación (por año).
- *gghbvtec03.png*: Gráfica de dispersión entre caudal modelado y simulado.
- *gghbvtec04.png*: Histograma de los residuales.
- *gghbvtec05.png*: Boxplot de los residuales (por mes).
- *gghbvtec06.png*: Boxplot de los residuales (por año).
- *gghbvtec07.png*: Gráfica de barras del balance de masas (mm/t).
- *gghbvtec08.png*: Gráfica de barras del balance de masas normalizado.
- *gghbvtec09.png*: Gráfica resumen de las funciones objetivo.
- *gghbvtec10.png*: Gráfica resumen de los parámetros optimizados por PEST.

#### 4.4.2 El modelo SWAT

El modelo **SWAT**, (*acrónimo de Soil and Water Assesment Tool*) es un modelo semidistribuido continuo de resolución temporal diaria, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de *Texas A&M* (*Figura 12*). **SWAT** fue originalmente concebido para analizar el impacto que las actividades humanas tienen sobre una cuenca hidrológica, lo cual incluye las prácticas de manejo y uso de la tierra, arrastre de sedimentos, pesticidas e incluso nutrientes.

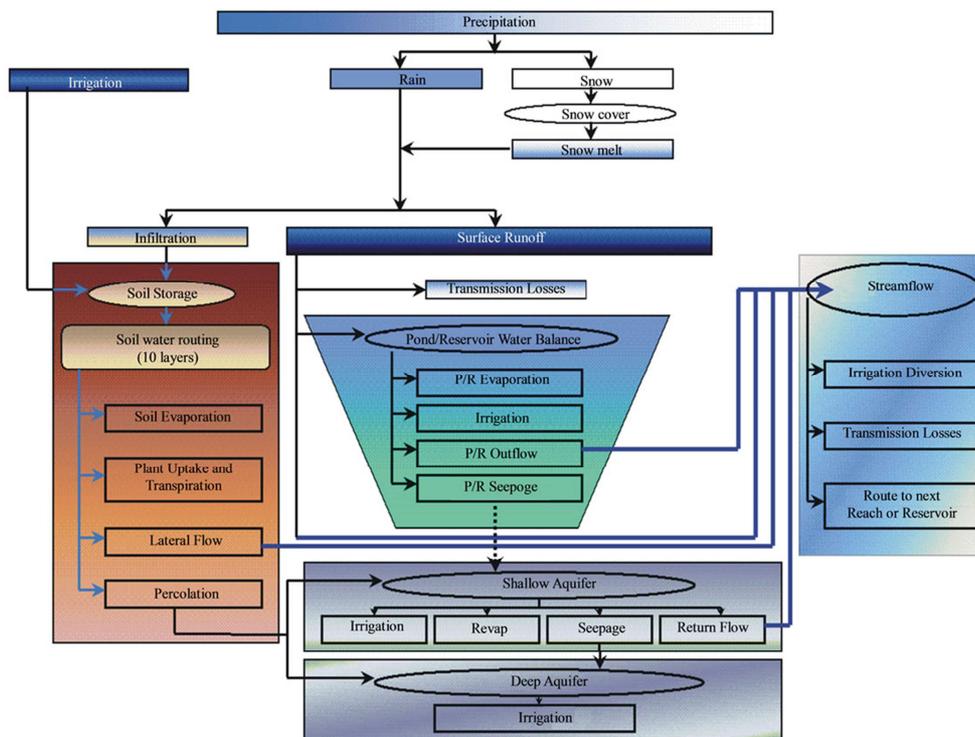


Figura 12. Estructura del modelo hidrológico SWAT.

Fuente: Neitsch *et al.* 2010.

El balance de masas general que resuelve el modelo SWAT (Figura 12) puede ser descrito como:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET_i - W_{seep} - Q_{gw}) \dots\dots\dots(10)$$

Donde;  $SW_t$  es el contenido de agua en tiempo  $t$ ,  $SW_0$  es el contenido de agua en el suelo en el tiempo  $t$ ,  $t$  es el tiempo en días,  $R_{day}$  es la precipitación diaria,  $Q_{surf}$  es la escorrentía,  $ET_i$  es la evapotranspiración diaria,  $W_{seep}$  es la percolación diaria en el perfil del suelo y  $Q_{gw}$  es el flujo base diario o flujo de retorno.

El modelo SWAT resuelve el balance de masas de forma semi-distribuida, a través de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs), donde la información de entrada discretizada por sub-cuenca en diversas categorías, incluyendo uso de la tierra, suelos y geomorfología (*ejemplo; pendiente, índices de forma, etc*). Las variables climáticas de entrada en el modelo SWAT (*con resolución temporal diaria*) son precipitación, temperatura del aire (*máxima y mínima*), radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. En caso de que existan registros incompletos de variables climáticas, SWAT está en capacidad de completar los registros faltantes mediante el uso de un simulador de clima. Este simulador de clima se fundamenta en el uso de registros promedio de valores mensuales de un periodo de al menos 10 años.

A continuación se describen las componentes hidrológicas más relevantes en relación al balance de masas del modelo **SWAT** (Neitsch *et al.* 2010; Proaño *et al.* 2006). Una descripción más detallada se descarta, ya que muchos módulos del modelo **SWAT** no fueron tomados en cuenta desde la propuesta misma de este proyecto, dado los objetivos originalmente planteados.

#### **4.4.2.1 Escorrentía**

SWAT simula volúmenes de escorrentía superficial y promedios máximos para cada HRU. Para ello, el utiliza una modificación del método de curva numérica del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt. De lo anterior, se derivan los contenidos de humedad en la zona no saturada del suelo.

#### **4.4.2.2 Redistribución e infiltración**

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua por un perfil de suelo luego de la entrada de precipitación. La redistribución es causada por diferencias en el contenido de humedad en el perfil. Una vez que el contenido de humedad a través de todo el perfil es uniforme, la redistribución finalizará. La filtración ocurre cuándo la capacidad del perfil no saturado del suelo es excedida y las capas inferiores no están saturadas. La tasa del flujo es gobernada por la conductividad saturada del perfil correspondiente.

#### **4.4.2.3 Evapotranspiración**

El modelo **SWAT** ofrece tres opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteith. La selección de uno u otro método dependerá grandemente de la disponibilidad de información climática disponible.

#### **4.4.2.4 Flujo lateral**

El flujo lateral es aquel que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta canales de drenaje, quebradas y ríos. En el modelo **SWAT**, el flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0-2 m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control.

#### **4.4.2.5 Percolación**

La fracción de flujo por percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual **SWAT** considera entre 0 y 2 m. Este flujo puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25m. El componente percolación del **SWAT** usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez el agua es percolada al acuífero profundo, ésta no puede alimentar el escurrimiento.

Por otro lado, Para efectos de este proyecto, el desempeño de modelo **SWAT**, se midió de acuerdo a las mismas funciones objetivo que se utilizaron en el modelo **HBV-TEC** (ec. (3)-(6)).

#### 4.4.2.6 Estructura de archivos en SWAT

Dado que **SWAT** es un modelo ya compilado (*donde el código no está abierto*) incluye un sinnúmero de archivos de entrada y salida. A continuación se describen los archivos de entrada más relevantes para efectos de este proyecto.

- \*.mgt: archivo ASCII que contiene información sobre el manejo de escenarios a nivel de HRU. Esto incluye parámetros de uso de la tierra. Para efectos de este proyecto solo se utilizó el parámetro CN2 (*Initial SCS CN II value*).
- \*.sol: archivo ASCII que contiene información sobre el manejo de escenarios a nivel de HRU. Esto incluye parámetros físicos de los suelos. Para efectos de este proyecto solo se utilizó el parámetro pawc (*Ave. AW Incl. Rock Frag*).
- \*.hru: archivo ASCII que contiene parámetros ligados a la generación de escorrentía a nivel de HRU. Para efectos de este proyecto solo se utilizó el parámetro ESCO (*Soil evaporation compensation factor*).
- \*.bsn: archivo ASCII que contiene parámetros ligados a la generación de escorrentía a nivel totalitario. Para efectos de este proyecto solo se utilizó el parámetro SURLAG (*Surface runoff lag time [days]*).
- \*.gw: archivo ASCII que contiene parámetros ligados a la generación de escorrentía a nivel de agua subterránea y percolación. Para efectos de este proyecto solo se utilizaron los siguientes parámetros: GW\_DELAY (*Groundwater delay [days]*), ALPHA\_BF (*BAseflow alpha factor [days]*), GWQMN (*Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur [mm]*), GW\_REVAP (*Groundwater "revap" Coefficient*), REVAPMN (*Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur [mm]*), RCHRG\_DP (*Deep aquifer percolation fraction*).
- \*.pcp: archivo ASCII que contiene registros diarios de precipitación por estación que contiene los campos: Station (*ID de la estación*), Lati (*latitud de la estación en WGS84*), Long (*longitud de la estación en WGS84*), Elev (*elevación geoidal de la estación en msnm*), Date (*fecha*), Value (*precipitación diaria en mm*).
- \*.temp: archivo ASCII que contiene registros diarios de precipitación por estación. Ídem del archivo \*.pcp donde Value representa temperatura media diaria en Celsius.
- \*.wgn: archivo ASCII que contiene registros mensuales medios de variables climáticas utilizadas en la generación de archivos incompletos (*al menos 10 años de registros previos*). Incluye los siguientes campos: TMPMX (*temperatura media máxima diaria del mes en Celsius*), TMPMN (*temperatura media mínima diaria del mes en Celsius*), TMPSTDMX (*SD de la temperatura media máxima diaria del mes en Celsius*), TMPSTDMN (*SD de la temperatura media mínima diaria del mes en Celsius*), PCPMM (*precipitación mensual media en mm*), PCPSTD (*SD de la precipitación mensual media en mm*), PCPSKW (*SKEW de la precipitación mensual media en mm*), PR\_W(1,mon) (*probabilidad del mes para día seco después de un día húmedo*), PR\_W(2,mon) ( ), PCPD (*promedio de días con precipitación en el mes*), RAINHHMX (*volumen de precipitación máxima en 0.5 horas por mes en mm*), SOLARAV (*radiación solar media del mes (MJ/m/day)*), DEWPT (*dew point promedio del mes en Celsius*), WNDAY (*velocidad de viento promedio diaria del mes (m/s)*)

Por otro lado, SWAT cuenta con un sinnúmero de archivos de salida numéricos (binarios y ASCII), de los cuales se detallan:

- *output.sub*: archivo ASCII que contiene las diversas componentes del balance de masas diario resuelto por SWAT incluyendo; SUB (subcuenca correspondiente), GIS (capa o mapa GIS correspondiente), AREAk2 (área de la subcuenca correspondiente en km<sup>2</sup>), PRECIP (precipitación en mm), SNOMELT (fusión de nieve en mm), PET (evapotranspiración potencial en mm), ET (evapotranspiración real en mm), SW (contenido de humedad de suelo en mm), PERC (flujo de percolación en mm), SURQ (escorrentía superficial en mm), GW\_Q (contribución del agua subterránea a la escorrentía en mm).
- *output.std*: archivo ASCII que contiene las diversas componentes del balance de masas diario resuelto por SWAT. Ídem del archivo *output.sub* pero incluyendo una discretización temporal diaria.
- *output.hrud*: archivo ASCII que contiene las diversas componentes del balance de masas diario resuelto por SWAT a nivel de HRU. Ídem del archivo *output.sub* pero incluyendo una discretización por HRU.

Al ser **SWAT** un modelo compilado, de carácter semi-distribuido, requiere de su propio toolbox de hidroprocesamiento. En este sentido, se utilizó la versión MWSWAT (George & Leon, 2007), la cual corre sobre MapWindow GIS. A su vez, MapWindow GIS utiliza el motor de hidroprocesamiento TAUDEM. MWSWAT requiere esencialmente tres archivos espaciales de entrada en formato \*.ASC, los cuales son: modelo de elevación digital (*DEM*), mapa de cobertura y uso de la tierra (*Global Land Cover Classification*) y mapa de suelo (*FAO/UNESCO classification*).

#### 4.4.3 Optimización paramétrica

El paquete de optimización paramétrica **PEST**, un acrónimo de *Parameter Estimation* (Doherty 2005), fue utilizado para calibrar los modelos **HBV-TEC** y **SWAT**. PEST fue seleccionado por las siguientes razones (a) **PEST** es una aplicación independiente al modelo, lo cual evita tener que realizar modificaciones al código original del programa, ya que **PEST** se comunica a través de los archivos propios de entrada y salida del modelo, (b) **PEST** ha sido exitosamente utilizado en numerosos tipos de modelos (c) **PEST** puede ser utilizado para llevar a cabo diversas tareas de índole predictivo y exploratorio incluyendo análisis de sensibilidad, correlación e incertidumbre y (e) **PEST** es de dominio público, por lo que puede ser utilizado sin restricciones de licenciamientos.

**PEST** es un programa de búsqueda baso en los algoritmos de Gauss-Marquardt-Levenberg (*GML*) el cual examina el espacio paramétrico del modelo con el objeto de encontrar el set de parámetros óptimo que minimice las desviaciones entre observaciones y modelaciones.

**PEST** utiliza la suma del cuadrado de las desviaciones PHI ( $\Phi$ ) como su función objetivo (Skahill 2009), la cual puede ser expresada matemáticamente como:

$$\phi = \sum_{i=1}^n w_i (O_i - M_i)^2 \dots\dots\dots(11)$$

Donde;  $n$  representa el número total de observaciones,  $O_i$  es el valor observado en el intervalo  $i$ ,  $M_i$  es el valor modelado en el intervalo  $i$  y  $w_i$  es el peso relativo asignado a cada observación.

Al inicio de cada iteración, **PEST** varía cada parámetro ajustable de forma incremental y re-ejecuta el modelo con el propósito de evaluar su sensibilidad. **PEST** determina si más iteraciones son necesarias para alcanzar la desviación mínima esperada. Dado que **PEST** se comunica a través de los propios archivos de entrada y salida del modelo, Implica que el modelo como tal debe ser ejecutable desde modo comando. La Figura 13 resume las labores de conexión entre **PEST** y los modelos **SWAT** y **HBV-TEC**. Los Cuadros 2 y 3, resumen los parámetros de optimización elegidos para los modelos **SWAT** y **HBV-TEC**. Los rangos de variación de cada parámetro fueron restringidos de acuerdo a valores realistas tomados de la literatura. Aun cuando la estructura de ambos modelos es muy distinta, se trató de elegir parámetros que fueran de una u otra manera comparables, al menos en los procesos o compartimentos relevantes que ambos modelos describen. Lo anterior, también contempla una disminución de número de incógnitas (*espacio paramétrico*) y una mejora sobre la confiabilidad sobre las predicciones de ambos modelos.

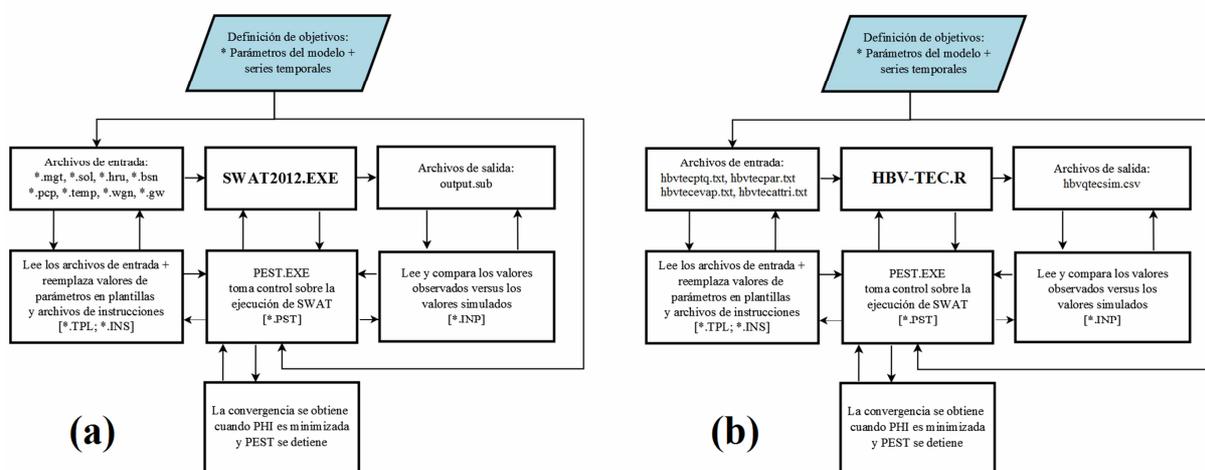


Figura 13. Esquema de conexión entre **PEST** y los modelos **SWAT** (a) y **HBV-TEC** (b).

Cuadro 2. Características y límites numéricos de optimización mediante **PEST** para el modelo **SWAT**.

Nombre del parámetro	Equivalencia PEST	Transformación	Unidades	Valor inicial	Valor mínimo	Valor máximo
CN2	pcn	lineal	adimensional	85	65	90
SOL_AWC	pawc	lineal	fracción	0.01	0.01	0.9
ESCO	pesco	lineal	adimensional	0.15	0.01	0.99
SURLAG	plag	lineal	días	0.1	0.1	4
ALPHA_BF	palpha	log	días	0.01	0.001	0.48
GW_DELAY	pdelay	lineal	días	30	1	120
RCHRG_DP	prdp	log	fracción	0.01	0.001	0.5
GWQMIN	pgwmin	lineal	mm	700	100	1000

Cuadro 3. Características y límites numéricos de optimización mediante **PEST** para el modelo **HBV-TEC**.

Nombre del parámetro	Equivalencia PEST	Transformación	Unidades	Valor inicial	Valor mínimo	Valor máximo
perc	pperc	lineal	mm	3	0.1	20
uzl	puzl	lineal	mm	10	10	100
k0	pk0	log	1/tiempo	0.1	0.0001	1
k1	pk1	log	1/tiempo	0.01	0.0001	1
k2	pk2	log	1/tiempo	0.02	0.0001	1
maxbas	pmaxbast	lineal	días	1.2	1	5
fc	pfc	lineal	mm	550	100	800
lp	plp	lineal	fracción	0.7	0.1	1
beta	pbeta	log	adimensional	1.5	0.1	4
fract_SMi	fracsm	lineal	fracción	0.5	0.05	1
fract_SLZi	fraclz	lineal	fracción	0.5	0.05	1

#### 4.5 Objetivo 5. Balance hídrico

Con base en la posición de la instrumentación meteorológica y fluviométrica (Figura 1), se procedió a discretizar la cuenca del río Agua Caliente en tres subcuencas; río Agua Caliente (*represa de JASEC*), Toyogres (*Linda Vista S.A*) y Purires (*Linda Vista S.A*). Tal y como se especificó en la metodología del objetivo 1, las observaciones de caudal en los cauces es de carácter indirecta. Los sensores instalados en los puntos de concentración, únicamente miden nivel piezométrico, el cual debe ser correlacionado con la velocidad de flujo mediante el correntómetro digital para finalmente correlacionar nivel con caudal.

Como es de esperarse, los datos observados, que a su vez se utilizan en la calibración de los modelos **HBV-TEC** y **SWAT**; no son perfectos y no están exentos de incertidumbre. Existen diversas razones para que estas correlaciones no alcancen una armonía perfecta. Los sensores de nivel HOBO están instalados en puentes que están expuestos a procesos de acumulación de basura y sedimentos que a la larga, alteran el perfil hidráulico de aproximación y salida de los puentes. Por otro lado, el fondo de los cauces es muy dinámico y cambiante; con lo que tienden a

haber cambios temporales sobre el mismo que facilitan la presencia de rutas preferenciales de flujo que alteran las lecturas de los sensores. He de recordarse que los planteamientos que describen la hidráulica de flujo libre, resulta válidos esencialmente en secciones geoméricamente estables y controladas.

De la misma forma, es importante resaltar que la posición de estos sensores de nivel es la que finalmente determina la discretización de las subcuencas; más que cualquier otro factor. Durante la formulación original de la propuesta de este proyecto, se pensó que se podría instalar un sensor de nivel en el punto mismo de concentración (*descarga*) del río Agua Caliente sobre el Río Navarro. Esta idea se descartó dada la alta complejidad de la topografía, la peligrosidad de la zona y la ausencia de puentes que cruzaran el cauce en puntos cercanos. Los atributos geomorfológicos derivados para cada subcuenca se resumen a: Perímetro (*km*), Área (*km<sup>2</sup>*), Longitud máxima del cauce (*km*), Centroide (*Este y Norte CRTM05*), Curva hipsométrica, tipo predominantes de suelo (*clase*), cobertura predominante del suelo (*clase*), pendiente (%). Estos atributos fueron utilizados para estimar parte de los parámetros iniciales de los modelos **HBV-TEC** y **SWAT** (Cuadros 2 y 3).

Por otro lado, las tres estaciones meteorológicas instaladas ([Figura 1](#)), se utilizaron para generar mapas raster continuos de precipitación y temperatura diarias. Los productos derivados más importantes del proceso de interpolación se resumen a series temporales de precipitación promedio diaria sobre cada subcuenca (mm/d) para un periodo de 675 días comprendidos entre los años 2013 y 2015. Para ello, se seleccionó el método del Inverso del Peso de la Distancia (*Inverse Distance Weighting IDW*) con una potencial exponencial de 3.

Es importante resaltar, que de acuerdo a varios experimentos numéricos iniciales, se optó por seleccionar una resolución espacial raster de 100x100m en la generación de todos los productos. Lo anterior, en vista del alto costo computacional de trabajar con una resolución espacial más alta. También debe mencionarse que se utilizó la proyección cartográfica CRTM05. En cuanto a los recursos de hardware, se utilizó un procesador Intel® Core™ i7-930, 2.80 GHz multi-core con 24 Gb de RAM. Finalmente, no se procedió a realizar ningún proceso de validación cruzada, dada la poca cantidad de estaciones disponibles.

#### **4.6 Objetivo 6. Indicadores de desempeño**

Diversas metodologías alrededor del desarrollo de indicadores de desempeño hidrológico, fueron analizadas para su potencial aplicación en el presente proyecto ([Hayhoe et al. 2006](#); [DIGESA 2010](#); [IDEAM 2010](#); [UNEP 1997](#); [UNESCO 1979](#); [CEDEX 2008](#)). En esencia, se identifican tres grandes grupos de indicadores de desempeño hidrológico:

1. **Indicadores climáticos:** lo cual incluyen fundamentalmente precipitación y temperatura.
2. **Indicadores hidrológicos:** lo cual incluye evapotranspiración, humedad de suelo, escorrentía, flujos, sequias y recarga.
3. **Índices de disponibilidad:** los cuales toman en cuenta factores antropogénicas y que relacionan la producción hídrica en virtud de la demanda.

En el caso de los dos primeros, estos indicadores, aunque relativamente simples de medir y derivar, pero requieren de periodos de observación extensos (*al menos 20 años*) que permitan analizar tendencias o patrones a través del tiempo bajo el contexto del análisis estadístico. En el

caso específico de este proyecto, si bien es cierto, todas estas variables fueron medidas o calculadas, éstas representan un intervalo temporal demasiado corto como sacar conclusiones válidas. En el caso de los índices de disponibilidad, si bien es cierto sufren de la misma limitación en cuanto a extensión de los registros temporales, los mismos están clasificados o tabulados, por lo que su derivación (*aunque representativa de un espacio muy corto*) es al menos comparable a estándares definidos. En este sentido, solo fueron incluidos aquellos indicadores que cuentan con amplia utilización y cuya derivación era posible con la información disponible para la cuenca del río Agua Caliente. Muchos otros indicadores de gran valor agregado como aquellos reportados en IDEAM 2010, son de gran valor agregado, pero de alta complejidad, a causa del rezago del en el monitoreo hidrológico de gran parte del territorio nacional (*excluyendo cuencas monitoreadas por ICE o AyA*). A continuación se detallan los índices de disponibilidad utilizados:

#### 4.6.1 Índice de disponibilidad per cápita de agua (DPCA)

Este indicador es también conocido como Índice de *estrés hídrico* o *disponibilidad per cápita al año*, el cual resulta de dividir el volumen total de agua que escurre en una cuenca (*o país*) cada año por el número de habitantes en un determinado año. Este índice es ampliamente utilizado a nivel internacional dada su simplicidad, disponibilidad de información (*para su estimación*) e interpretación intuitiva. El Cuadro 4 muestra los valores críticos de disponibilidad per cápita al año de agua (Falkenmark & Lindh 1974). En el caso específico de este proyecto, los datos del censo nacional del año 2011 (INEC 2011) junto con el Atlas digital de Costa Rica 2014 (ITCR 2014) fueron utilizados para estimar la población total en la cuenca del río Agua Caliente de acuerdo a los distritos que pertenecen a cada uno de los cantones involucrados (Figura 14). El DPCA también tiene sus desventajas, en el sentido de que los valores críticos de disponibilidad podrían cambiar radicalmente entre regiones o países. Por otro lado, tampoco toma en consideración la administración de la infraestructura de gestión de agua (*agua potable, riego, industria*).

Cuadro 4. Valores críticos de disponibilidad per cápita al año de agua

Valor crítico per capita anual (m3)	Interpretación
1700	Situación de posible estrés hídrico
1000	Se experimenta escasez de agua
500	Escasez absoluta

#### 4.6.2 Índice de aridez

El índice de aridez es un indicador cuantitativo del déficit de agua que existe en una región (o cuenca) en función de su régimen hidroclimático. Este indicador relaciona tres variables climáticas: precipitación, temperatura y evaporación. El índice se obtiene dividiendo la precipitación anual entre la evapotranspiración potencial, siendo ésta última, calculada por el método de Penman-Monteith (UNEP 1997). Lo anterior, coincide con el método utilizado en éste proyecto. El Cuadro 5 muestra la clasificación de la región de acuerdo al índice de aridez.

### 4.6.3 Índice de escasez

El índice de escasez se resume al cociente de la demanda total entre la oferta superficial neta. Para éste indicador, se definen las siguientes categorías:

- Alta: cuando la demanda alcanza el 40% de la oferta
- Media: cuando la demanda se encuentra entre el 20 y 40% de la oferta.
- Moderada: cuando la demanda se encuentra entre el 10 y el 20% de la oferta.
- Baja: cuando la demanda no supera el 10% de la oferta.

Para el caso específico de este proyecto, la única demanda que se cuantificó fue la demanda por generación eléctrica, ya que todas las demás clases de demanda estaban por fuera de los objetivos originalmente planteados.

Cuadro 5. Clasificación de la región de acuerdo al índice de aridez según UNEP (1997).

Valor	Clima
0.03	Hiper-Árido
0.03-0.20	Árido
0.20-0.50	Semiárido
0.50-0.65	Seco sub-húmedo
> 0.65	Húmedo

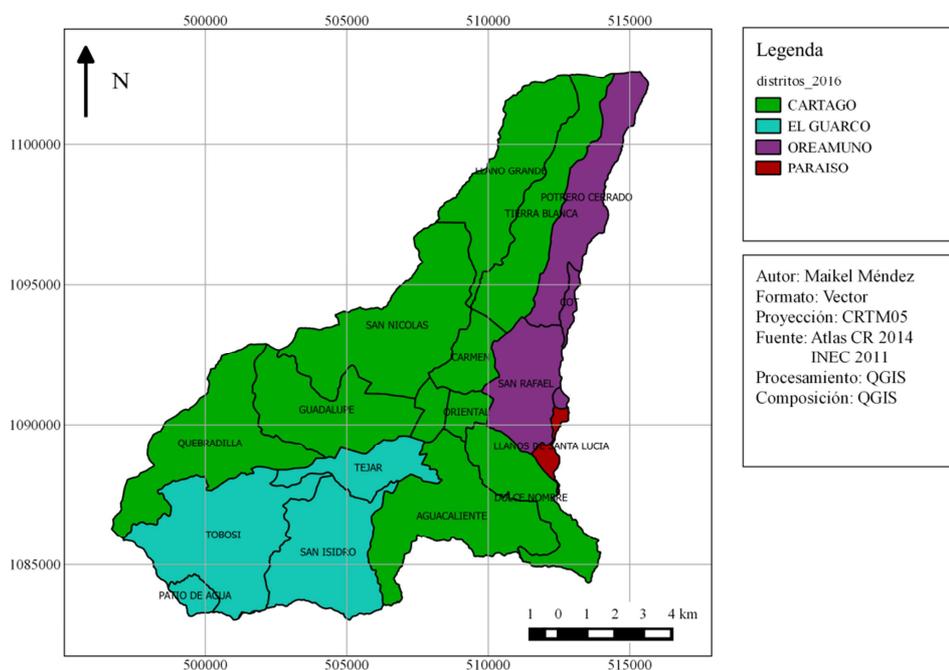


Figura 14. Mapa de distritos pertenecientes a los cantones involucrados en la cuenca del río Agua Caliente.

## 5 RESULTADOS Y ANALISIS

### 5.1 Objetivo 1. Instrumentación de campo

#### 5.1.1 Datos de precipitación

Las estaciones meteorológicas instaladas (Cuadro 1 y Figura 1) registraron datos continuos durante un periodo de 675 días, comprendidos entre el 01-04-2013 hasta el 04-02-2015. Dichos datos corresponden a variables meteorológicas promedio con muestreos temporales diarios (*cada 24 horas*), lo cual incluyó temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión atmosférica, radiación visible, radiación ultravioleta y humedad de suelo. Las estaciones de Campus-ITCR y Llano-Grande, empezaron a registrar datos desde 2012. No obstante la estación Barrancas inicia registros hasta Marzo de 2013. A la fecha de presentación de este informe, estas tres estaciones aún se encuentran activas y en operación. La Figura 15 muestra un Boxplot (*diagrama de cajas*) de precipitación diaria (*mensual*) para la cuenca del río Agua Caliente durante el periodo 2013-2015.

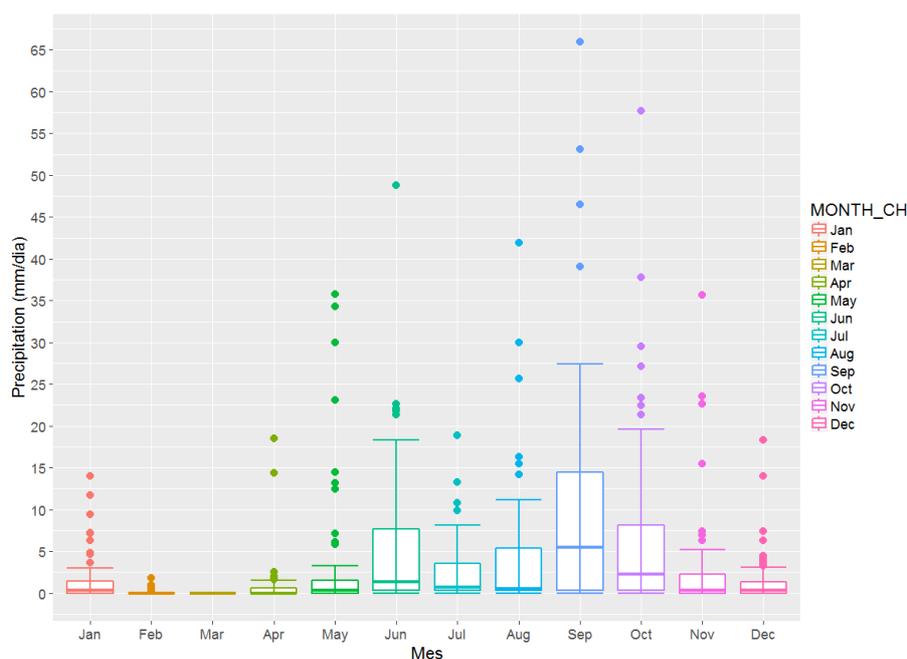


Figura 15. Boxplot de precipitación diaria mensual para la cuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

Los resultados muestran tasas de precipitación bajas para los meses más secos, desde Febrero hasta Abril incluso. A partir del mes de Mayo y hasta Noviembre, la precipitación aumenta considerablemente para encontrar su mayor distribución durante los meses de Octubre y Noviembre. Algo que se desprende claramente del Boxplot, es el hecho de que en términos generales (*con base en la mediana y el rango intercuartil*) los volúmenes de precipitación en la cuenca son relativamente bajos, en la mayoría de los casos por debajo de 2 mm/día.

No obstante, existe gran cantidad de eventos de alta precipitación diaria que se presentan de forma aleatoria independientemente del mes bajo análisis. Prueba de ello, son los valores pico (*atípicos o outliers*) que se presentan durante los meses de Agosto, Septiembre y Octubre, algunos en rangos superiores a 50 mm/día. Estos valores atípicos lo que indican es la alta variabilidad del fenómeno de precipitación per se y que se escapa de los preceptos mismo de la normalidad paramétrica. Evidencia de ello, es la distribución de los datos de precipitación (para todo el periodo) mostrado por la Figura (Figura 16). La misma sugiere una distribución de cola altamente asimétrica con valores medianos y rangos intercuartiles en el orden de 2 y 8 mm/día respectivamente. Lo anterior, sugiere una distribución estadística de tipo Weibull, LogNormal, Burr o Pareto. Sin embargo, resulta inútil sugerir cursos de acción con registros tan cortos. No menos de diez años de registros se requerirían para una estimación confiable de tales distribuciones.

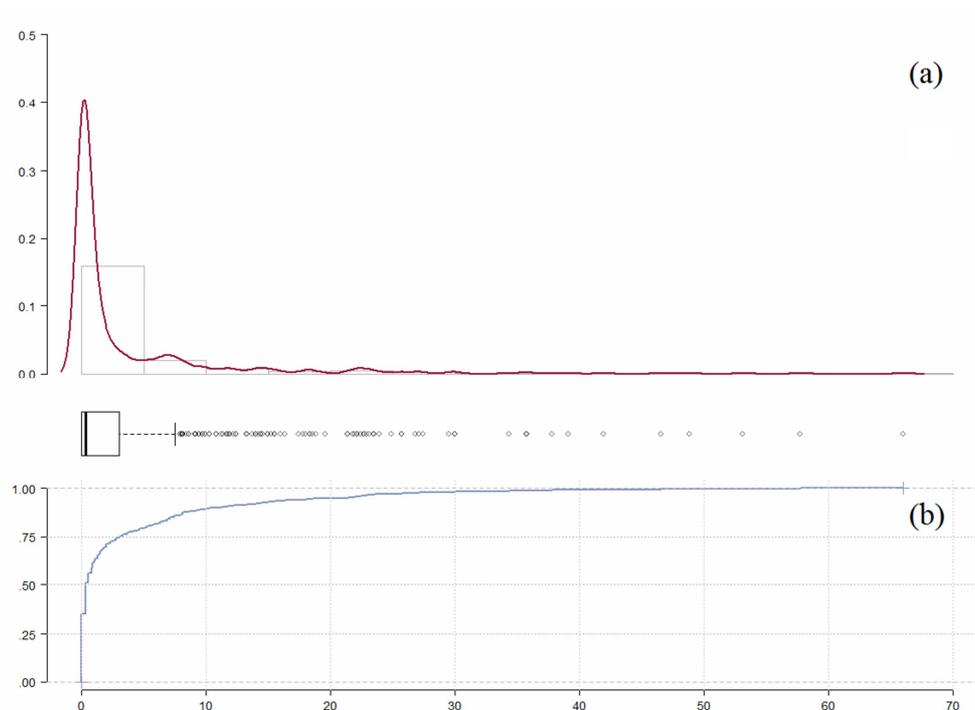


Figura 16. Histograma de precipitación (a) y gráfico de frecuencias acumuladas (b) para la cuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

El Boxplot de precipitación diaria anual (Figura 17) ratifica aún más este comportamiento asimétrico (*no-normalmente distribuido*) discretizado temporalmente por años. Debe recordarse que tanto los registros de 2013 como los de 2015 no incluyen todo el año. Nuevamente, la mayoría de los eventos de precipitación se ubican en rangos intercuartiles por debajo de 5 mm/día con gran cantidad de eventos de alta precipitación presentados de forma esporádica. En este sentido, tanto el modelo HBV-TEC como SWAT deberían de estar en capacidad de asimilar una distribución de precipitación (*fuerza motriz de cualquier modelo hidrológico*) tan desuniforme como la que se presenta en la cuenca del río Agua Caliente.

### 5.1.2 Datos de flujos

El comportamiento de los flujos (*punto de concentración represa JASEC*) no dista mucho de lo esperado en función de la precipitación (Figuras 18 y 19). Los meses de Septiembre y Octubre son los más productivos en cuanto a producción de fljo con valores mediados en el orden de 4.5 y 6.5 mm/día. Algo que llama la atención, es el hecho de que no existen valores atípicos en ninguno de estos dos meses, lo que a su vez sugiere una distribución homogénea (*normal*) en ese periodo. Durante los meses de Mayo a Junio, se dan valores medianos por debajo de 2 mm/día con gran cantidad de eventos de alta escorrentía, probablemente producto del alto porcentaje del área cubierto por uso urbano-alterado (Cuadro 4). De la misma forma, el Boxplot de flujo diario anual para la cuenca del río Agua Caliente, muestra un comportamiento intercuartil muy similar para los años 2013 y 2014 y altamente disimilar para el año 2015. Lo anterior, como consecuencia de que este último, solo abarca los primero tres meses del año. Uno de los aspectos que más incertidumbre imparte a las observaciones de flujo es el hecho de que la medida es de carácter indirecto. Por lo anterior, deben hacerse campañas de medición de velocidad con correntómetro que no siempre coinciden con los eventos de precipitación pico. Otro elemento importante, es la acumulación de sedimentos sobre los sensores de nivel HOB0 que podrían disminuir la confiabilidad de los registros. Escombros, incluyendo piedras y ramas, también alteran la sensibilidad de los sensores, por lo que los registros digitales deben ser depurados a priori para detectar eventos de este tipo. Otro problema que se presenta, es la dinámica misma de los cauces, que obliga a estar en constante re-planteo de los perfiles de velocidad, lo cual es costoso en términos de tiempo y recurso humano.

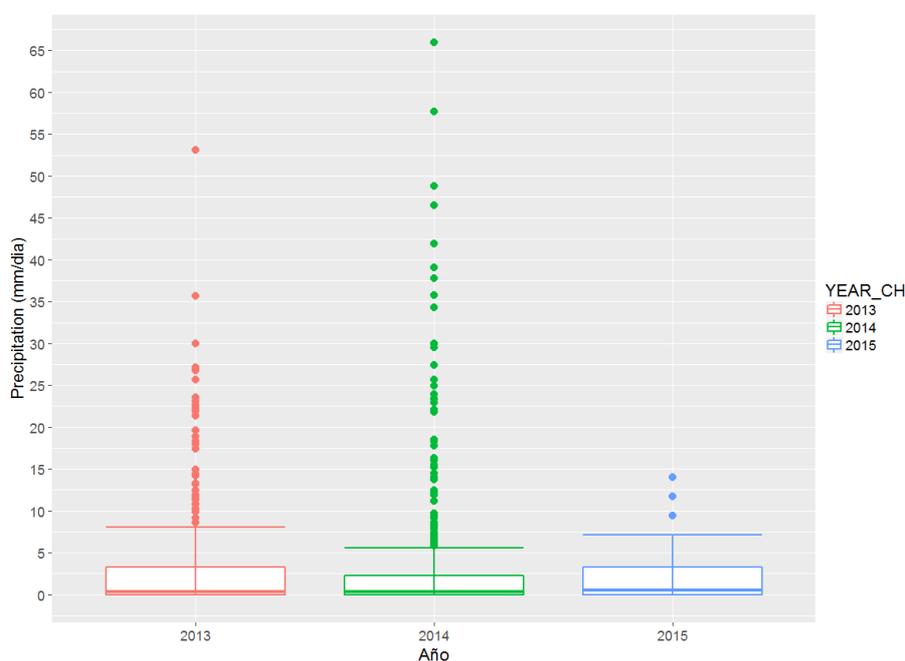


Figura 17. Boxplot de precipitación diaria anual para la cuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

Finalmente, debe quedar claro de que podría darse aportes de flujo (*por precipitación*) en secciones de la cuenca que ninguna de las estaciones meteorológicas está en capacidad de registrar. Una descripción detallada de los registros de flujo se expone en la sección de desempeño de modelos hidrológicos.

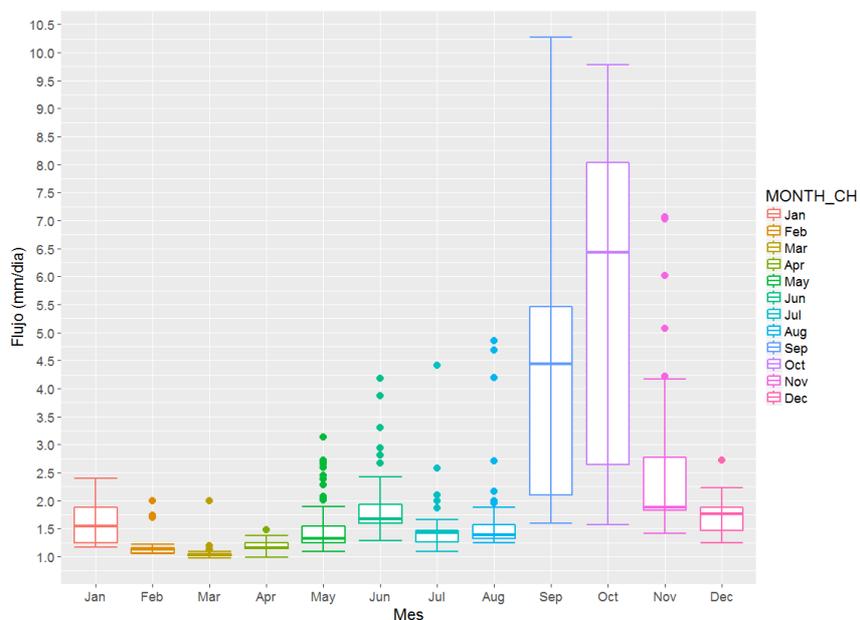


Figura 18. Boxplot de flujo diario mensual para la cuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

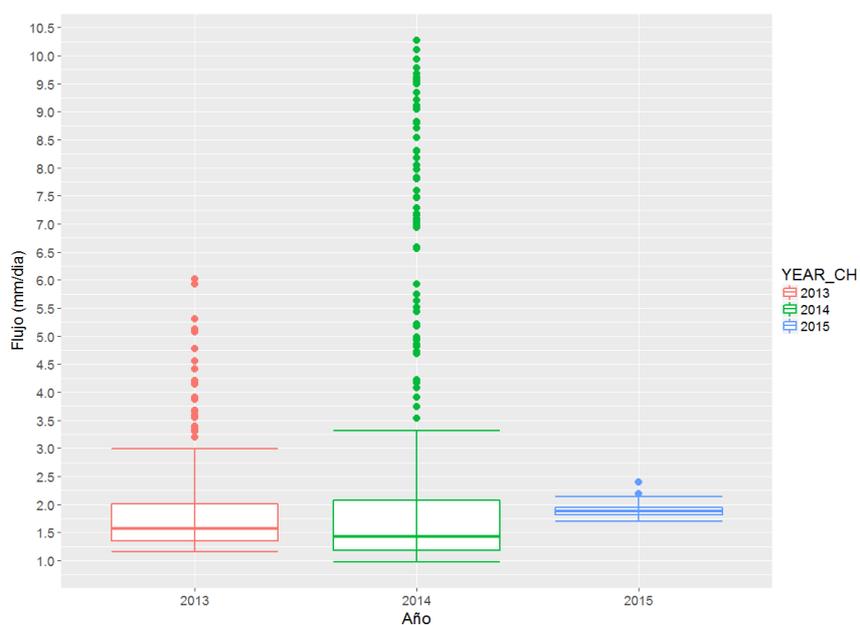


Figura 19. Boxplot de flujo diario anual para la cuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

## 5.2 Objetivo 2. Mapas de uso del suelo

Los resultados del proceso de clasificación (Cuadro 6 y Figura 20), muestran a la cuenca del río Agua Caliente (179.75 km<sup>2</sup>) dominada por tres grandes usos; Urbano\_alterado (41.05%), Cultivos (25.09%) y Suelo\_Preparación (21.45%). Se sabía *a priori* que la cuenca *per se*, presentaba una elevada alteración antropogénica debido a la presencia de los centros poblacionales de Cartago, Oreamuno y el Guarco principalmente. En este sentido, durante el proceso de clasificación espectral se elaboraron clústeres que involucraran la firma espectral de superficies alteradas (*asfalto, concreto y techos principalmente*). Posteriormente, se procedió a reclasificar en un solo uso (o clase) denominada Urbano\_alterado. Un porcentaje tan alto de cobertura urbana pudo en alguna medida afectar el desempeño de los modelos **HBV-TEC** y **SWAT**, ya que las superficies impermeables podrían no apegarse enteramente a los supuestos conceptuales de cada modelo.

Cuadro 6. Resultados del proceso de clasificación espectral para la cuenca del río Agua Caliente.

Uso	Pixiles (unitario)	Fracción_pixeles (%)	Area (km <sup>2</sup> )
Bosque	97666	5.43	9.77
Suelo_Preparación	385547	21.45	38.55
Pastoreo	77539	4.31	7.75
Cultivos	450926	25.09	45.09
Urbano_Alterado	737846	41.05	73.78
Nubes	48024	2.67	4.80
Total	1797548	100.00	179.75

Por otro lado, existe una alta rotatividad de cultivos agrícolas principalmente en la zona norte de la cuenca, ya que la clase Suelo\_Preparación llega a un valor cercano al 22%. Debe quedar claro, que estas imágenes fueron tomadas en Junio de 2011 y que en ese sentido, no representan más que un único instante en el tiempo. En consecuencia, al momento de presentación de este informe habrán pasado 5 años desde la toma de esos datos. Esta clase de Suelo\_Preparación representa ya sea suelos desnudos, en preparación o recién cultivados, donde de una u otra forma, la superficie tiene un porcentaje de exposición de al menos 85%. Aun cuando el arrastre de sedimentos quedó fuera de los alcances de este proyecto, es evidente que con las prácticas agrícolas imperantes, la pérdida de suelo y demás problemas ambientales, debe ser de gran proporción. El uso de Cultivos (25.09%), representan superficies cubiertas por algún tipo de cultivo ya sea perenne o estacional. Si se sumasen estas dos clases junto con pastoreo se obtendría un único uso “agrícola” de 51.66% de la superficie total analizada.

Es interesante notar, que la cuenca del río Agua Caliente tiene una cobertura boscosa muy limitada, de apenas 5.43%, esencialmente en las zonas de protección del Volcán Irazú (*norte*) y Cerro de la Muerte (*Sur*). Lo anterior es preocupante, ya que las coberturas boscosas protegen los suelos, reduciendo el arrastre de sedimentos, ayudan a preservar la biodiversidad del área, previenen crecidas repentinas, reducen la contaminación por factores antrópicos; lo que mejora la calidad del agua. Finalmente, debido a la concentración de nubes, existe una sección del mapa que no pudo clasificarse y que se ubica en la esquina sur-oeste del dominio de la cuenca. El porcentaje de nubes llega al 2.67%, lo que se considera aceptable.

Nuevamente, si se necesitase una clasificación supervisada con más cantidad de usos, los datos espaciales deberían ser actualizados.

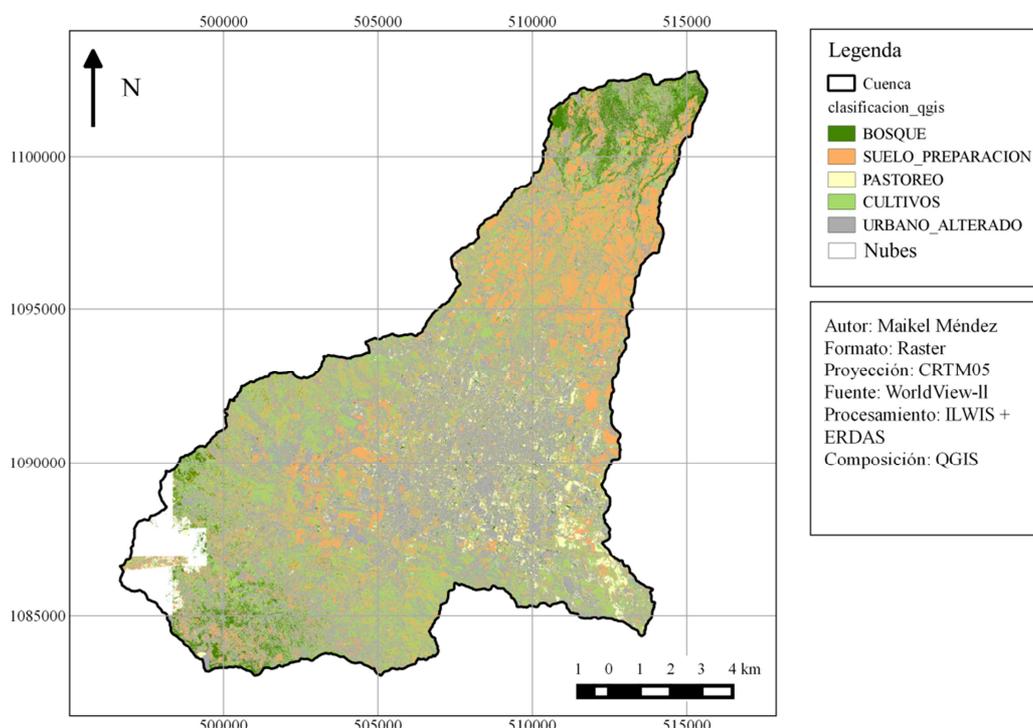


Figura 20. Mapa de clasificación espectral para la cuenca del río Agua Caliente utilizando imágenes del satélite WorldView-I (resolución espacial de 10 x 10 m).

### 5.3 Objetivo 3. Modelos de elevación de terreno

#### 5.3.1 Modelo de elevación digital (DEM)

La Figura 21 muestra el modelo de elevación digital (DEM) para la cuenca del río Agua Caliente elaborado a partir de las imágenes del satélite WorldView-II junto con los puntos de control de terreno GCPs (ANEXO 6). Para este producto, se obtuvo un RMSE de 1.689 m (ec. (1)), muy por debajo de la resolución de 10 x 10 m del producto final, lo que da confianza sobre la calidad del mismo. Nuevamente, la decisión final sobre la resolución elegida, estuvo más ligada a la redundancia de información sobre las estructuras conceptuales de los modelos **HBV-TEC** y **SWAT** que sobre costos computacionales.

El archivo DEM raster originalmente generado presentaba algunas inconsistencias debido a la discontinuidad de los contornos generados a partir de ERDAS. Estas inconsistencias se representan como NAs (Not Available Data) que en este caso, son representados por la constante -9999. Consecuentemente, se decidió tratar el DEM antes de realizar la extracción del área a ser trabajada, lo anterior, con el propósito de que todos los sectores que presentaban errores, pudieran ser corregidos mediante el relleno de depresiones.

Para esto se utilizó la herramienta *Fill Sink* de ILWIS, la cual permitió dar un valor a las áreas donde se presentan errores en el DEM.

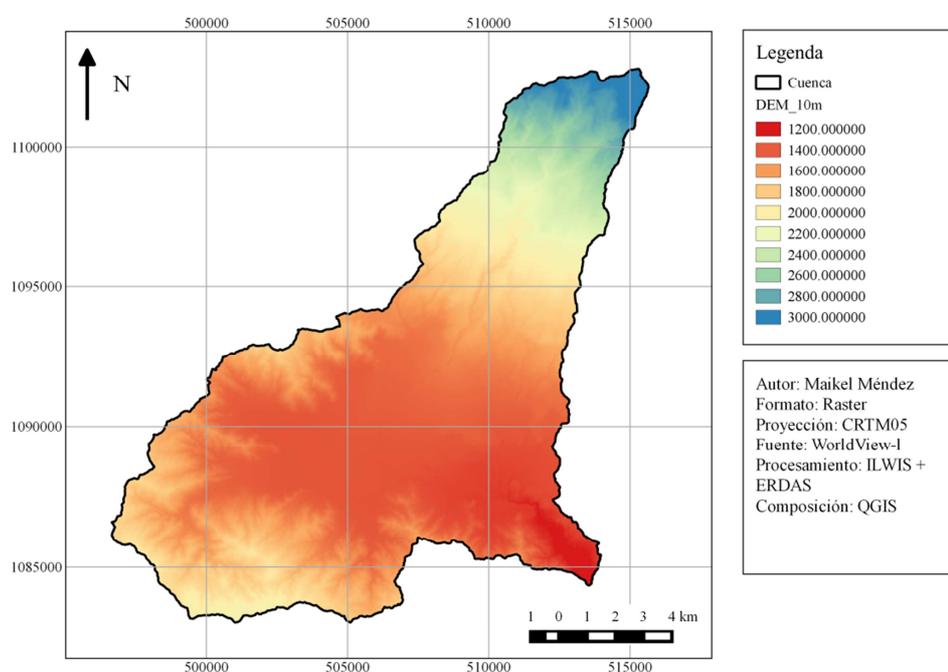


Figura 21. Mapa de elevación digital (DEM) para la cuenca del río Agua Caliente utilizando imágenes del satélite WorldView-II (*resolución espacial de 10 x 10 m*).

Básicamente, ILWIS calcula para cada píxel dentro del área con error el valor mínimo con base en los 8 vecinos más cercanos, esto permite interpolar el valor más próximo para el área afectada según los vecinos circundantes del DEM. Desde el punto de vista de caracterización, la cuenca del río Agua Caliente se encuentra entre las coordenadas (516509.70, 1082411.86) y (494509.70, 1102931.86) del sistema CRTM05, provincia de Cartago y que abarca los cantones de Cartago, Paraíso, Oreamuno y El Guarco. Del área total de la cuenca (179.75 km<sup>2</sup>), 43% se encuentra por debajo de los 1500 msnm, mientras que 82% del área está por debajo de los 2000 msnm. La elevación máxima es de 3430 msnm (*Parque Nacional Volcán Irazú*) mientras que la mínima es de 1074 msnm (*desembocadura al río Navarro, Valle de Orosi*). Los tipos de suelo varían de texturas arcillosas a limo-arcillosas, principalmente inceptisoles y ultisoles. No existe una clara distinción entre estaciones secas o húmedas en la zona. No obstante, existen claramente dos periodos particularmente lluviosos, uno de Mayo a Julio y otro de Septiembre a Noviembre los cuales tienen una clara influencia de actividad ciclónica en la costa caribe de Costa Rica, donde la precipitación anual promedio oscila entre 1270y 1530 mm ([Retana & Villalobos 2006](#)). Oficialmente es posible localizar la cuenca dentro de las hojas Topográficas Istarú, Tucurrique, Tapantí y Pejibaye del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:50000.

### 5.3.2 Hidroprocesamiento

Además de ser importantes para comprender la situación actual de la cuenca del río Agua Caliente, para los modelos hidrológicos (HBV-TEC y SWAT) son importantes los atributos de elevación, coberturas, pendientes y aspecto. En este sentido, una vez tratado el DEM, se procedió a la extracción de parámetros y funciones de hidroprocesamiento. El mapa de sombras de la cuenca (Figura 22), da una clara impresión del relieve de la cuenca, la cual presenta 4 tributarios principales, el río Taras con una longitud de 9.3 km hasta la desembocadura con el río Reventado; éste último con un longitud de 14.9 km hasta su unión con el río Agua Caliente, el río Toyogres con 9.5 km y el río Purires de 11.1 km, ambos contados hasta su desembocadura con el río Agua Caliente. Estos ríos son de gran importancia pues aportan gran parte del flujo que se registra y es captado en la represa JASEC.

### 5.3.3 Pendiente

La cuenca del río Agua Caliente presenta características físicas muy marcadas, un relieve montañoso y 3 cañones importantes; el primero es el del río Reventado que va desde la naciente del mismo hasta la confluencia con el río Agua Caliente, luego el del río Taras y por último el cañón del río Toyogres, el cual es considerablemente pronunciado. Para tener una mejor comprensión, el Cuadro 7, presenta la clasificación de pendientes de acuerdo a la clasificación FAO. La Pendiente, la cual es expresada en porcentaje, representa la proporción máxima del cambio entre cada celda del mapa raster y sus vecinos, de tal forma que represente el máximo cambio de elevación sobre la distancia de una celda con respecto a sus ocho vecinos cercanos. Mediante la Figura 23, es posible apreciar que los sectores con las pendientes más escarpadas se localizan a lo largo de los cauces, principalmente en las zonas altas de cada una de las subcuencas. Llama la atención, que se presente un porcentaje tan elevado del área total en las categorías fuertemente inclinado, moderadamente escarpado, escarpado y e inclinado. En esencia, la cuenca del río Agua Caliente, es un valle de alta pendiente, con pocos sectores planos y que dichos sectores, podrían ser antiguas márgenes de los ríos de la zona.

En el caso del modelo **HBV-TEC**, el atributo de pendiente tiene un efecto directo sobre las contribuciones de caudal provenientes del compartimento de almacenamiento en la zona superior (*SUZ*), lo cual incluye a los caudales rápidos  $Q_0$  y  $Q_1$ , ambos controlados por los coeficientes de recesión  $k_0$  y  $k_1$ .

Por otro lado, la pendiente también participa en el correcto análisis de la clasificación de las coberturas, específicamente para caracterizar sectores que presenten lagos. Lo anterior, debido a que modelo **HBV-TEC** clasifica como lagos aquellas zonas con pendiente de 0%.

En cuanto al modelo **SWAT**, la pendiente es determinante en la asignación de los atributos de las Unidades de Respuesta Hidrológica (*HRUs*). Es igualmente relevante en la estimación flujo lateral subsuperficial y la generación de escorrentía superficial; principalmente en el cálculo de los números de curva (*cn*) del método SCS. En este mismo sentido, la pendiente es utilizada por el modelo **SWAT** en el cálculo del tiempo de concentración (*tc*) y en el tránsito hidráulico en la red de drenaje; ambos casos estimados a partir de una simplificación de la ecuación de Manning. Finalmente, SWAT utiliza el valor de pendiente para asignar atributos de inclinación a la red de drenaje y estimar la mayor longitud de cauce.

Cuadro 7. Clasificación de pendientes de acuerdo a la clasificación FAO.

Fuente: (FAO, 2009).

Clase	Descripción	% Clasificación	% Area cuenca
1	Plano	0 - 0.2	5.59
2	Nivel	0.2 - 0.5	1.39
3	Cercano al nivel	0.5 - 1.0	0.35
4	Muy ligeramente inclinado	1.0 - 2.0	1.74
5	Ligeramente inclinado	2.0-5.0	4.62
6	Inclinado	5.0-10.0	15.87
7	Fuertemente inclinado	10.0-15.0	15.85
8	Moderadamente escarpado	15.0 - 30.0	14.15
9	Escarpado	30.0 - 60.0	31.54
10	Muy escarpado	> 60.0	8.87

Al mismo tiempo, la pendiente tiene un efecto sobre la función de fusión (derretimiento) de nieve que en el caso de la cuenca del río Agua Caliente, no tiene relevancia.

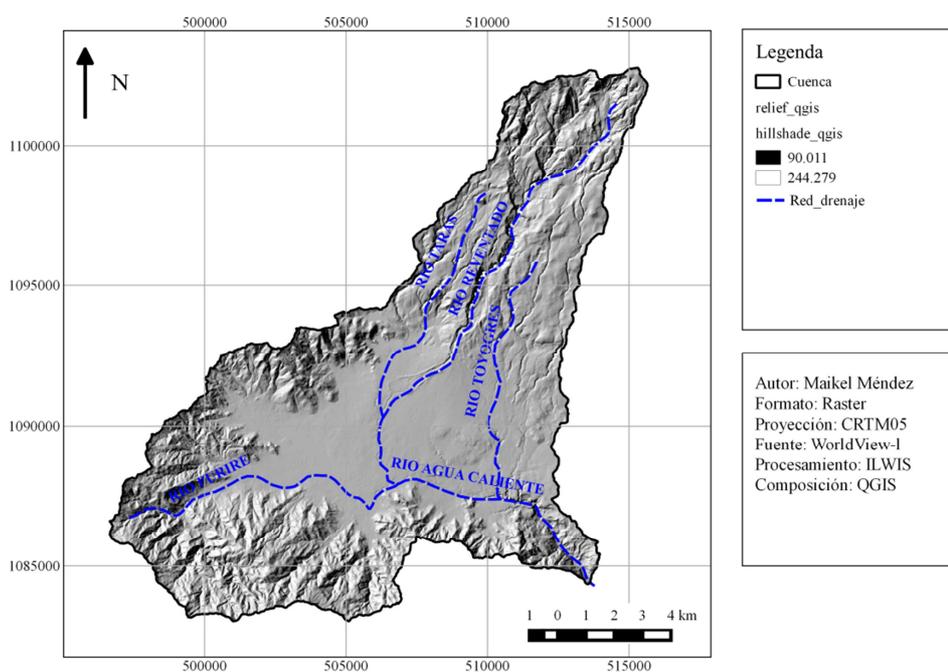


Figura 22. Mapa de relieve (*sombras*) para la cuenca del río Agua Caliente utilizando imágenes del satélite WorldView-II (*resolución espacial de 10 x 10 m*).

Queda claro que al tratarse de una zona montañosa escarpada, presenta un régimen de precipitación discontinuo, debido a la interacción existente entre los factores geomorfológicos locales, el clima de la región y su microclima.

La compleja fisiografía de la cuenca, interactuando en mayor o menor medida con diversos mecanismos generadores de precipitación, produce un patrón complejo en la distribución de precipitación y su cuantificación resulta por demás compleja, especialmente con un número reducido de estaciones.

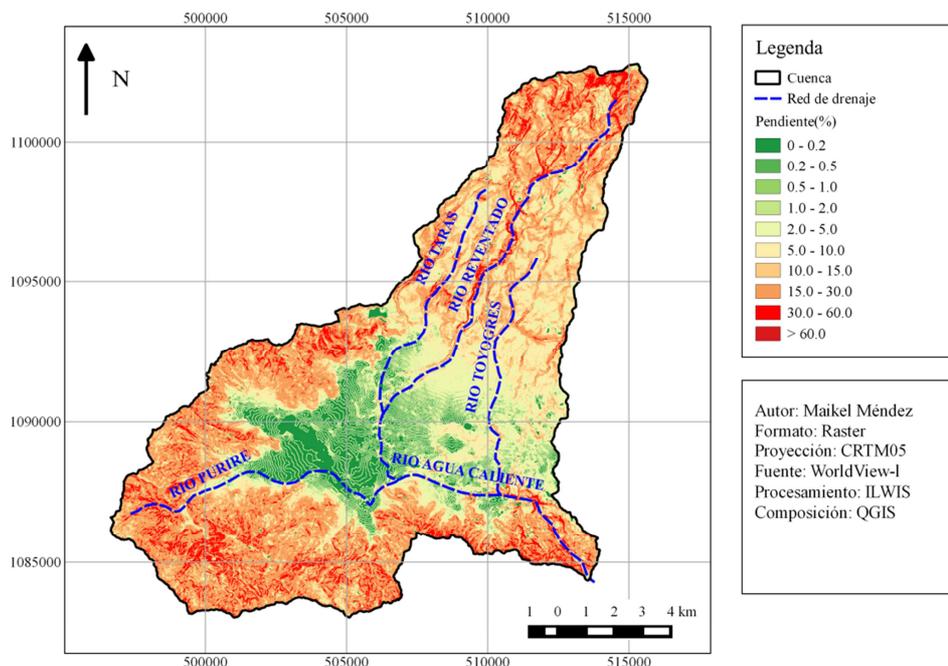


Figura 23. Mapa de pendiente (%) para la cuenca del río Agua Caliente utilizando imágenes del satélite WorldView-II (resolución espacial de 10 x 10 m).

### 5.3.4 Dirección en laderas

La dirección de laderas (*aspecto*) en la cuenca es igualmente relevante, ya que permite establecer la dirección cardinal de las laderas que se presentan (Figura 24). Su ubicación es utilizada para determinar en qué dirección se moverán los flujos sobre el terreno. Para la cuenca del río Agua Caliente, se puede identificar que la dirección dominante de las laderas, corresponde (*como es de suponer*) a la dirección de los ríos de la zona. El Cuadro 8, resume las direcciones de flujo predominantes en la cuenca, siendo estas; Sur (20.65%), Oeste (15.77%), Este (14.35%) y Sur-Oeste (13.14%), lo que favorece la concentración de flujo hacia el centro de la cuenca y con descarga Sur-Este. El mapa de aspecto es utilizado por ambos modelos hidrológicos (*HBV-TEC* y *SWAT*) junto con el mapa de pendientes para calcular el factor por derretimiento de nieve, asociado a la posición del sol en el calendario Juliano. Además, el aspecto indica el ángulo de ubicación de la clase de terreno en grados, lo que a su vez permite determinar las rutas de acumulación de flujo y finalmente derivar así la red de drenaje de la cuenca y discretizar el dominio de trabajo de acuerdo al umbral de acumulación de flujo. La acumulación de flujo, demuestra patrones que siguen los flujos basándose en la dirección cardinal de aspecto.

Al ejecutar el módulo de acumulación de flujo en ILWIS, se obtiene un mapa raster de representación logarítmica que contiene los valores acumulados de flujo hidrológico. Estos a su vez, representan la cantidad de píxeles de entrada que contribuyen con flujo a cualquier punto de concentración o desagüe.

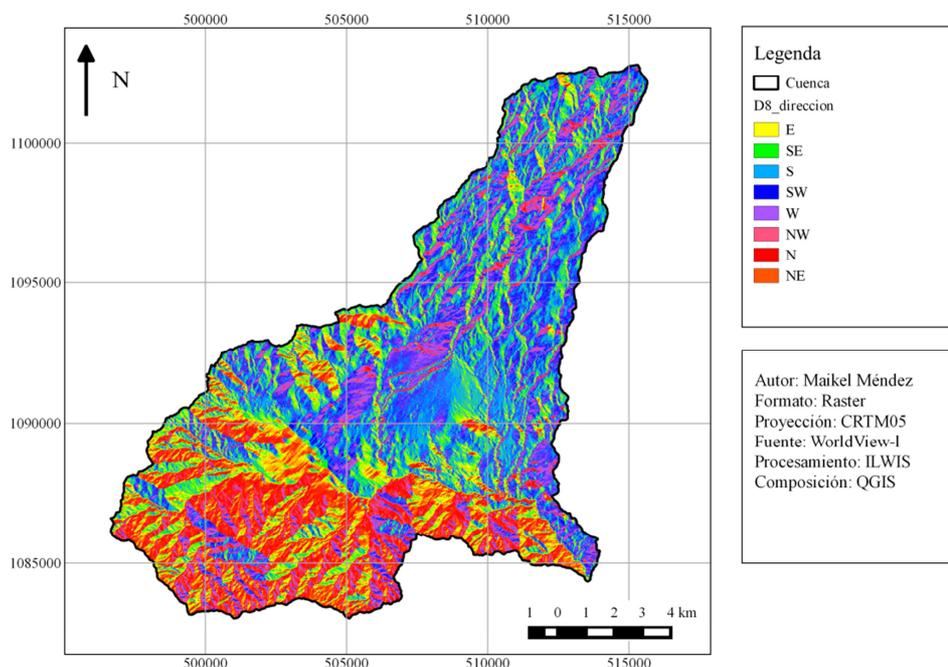


Figura 24. Mapa de dirección (*aspecto D8*) para la cuenca del río Agua Caliente utilizando imágenes del satélite WorldView-II (*resolución espacial de 10 x 10 m*).

Cuadro 8. Distribución de la dirección (*aspecto D8*) para la cuenca del río Agua Caliente.

Aspecto	Pixiles (unitario)	Fracción_pixeles (%)	Area (km2)
N	229604	12.77	22.96
NE	136510	7.59	13.65
E	258027	14.35	25.80
SE	181790	10.11	18.18
S	371265	20.65	37.13
SW	236309	13.14	23.63
W	283664	15.77	28.37
NW	101072	5.62	10.11

A lo interno de ambos modelos hidrológicos (*HBV-TEC* y *SWAT*)

### 5.3.5 Discretización de subcuencas

Con el propósito de simplificar la red de drenaje de las subcuencas seleccionadas (Figura 25), la densidad de la red drenaje de toda la cuenca, se derivó a partir de un umbral de concentración de 135000 celdas (*pixeles*). Lo anterior, permitió discretizar las subcuencas de los ríos Purires,

Toyogres y Agua Caliente (*hasta la altura de la represa JASEC*). Como se mencionó en la sección de metodología, la cuenca no pudo ser modelada hasta su punto de concentración debido a la imposibilidad práctica de instalar sensores de nivel en el ese punto. El Cuadro 8 muestra el resumen de atributos geomorfológicos de las tres subcuencas. Nuevamente, las pendientes promedio alcanzan valores altos, desde 8.94% para la subcuenca del río Toyogres hasta un 19.85% para la cuenca del río Purires. Debe resaltarse, que aun cuando las subcuencas Purires y Agua Caliente (*JASEC*) se analizaron por separado desde el punto de vista geomorfológico, ambas subcuencas fueron conectadas en serie en el proceso de modelación hidrológica. El Cuadro 9, resume las características geomorfológicas de la cuenca.

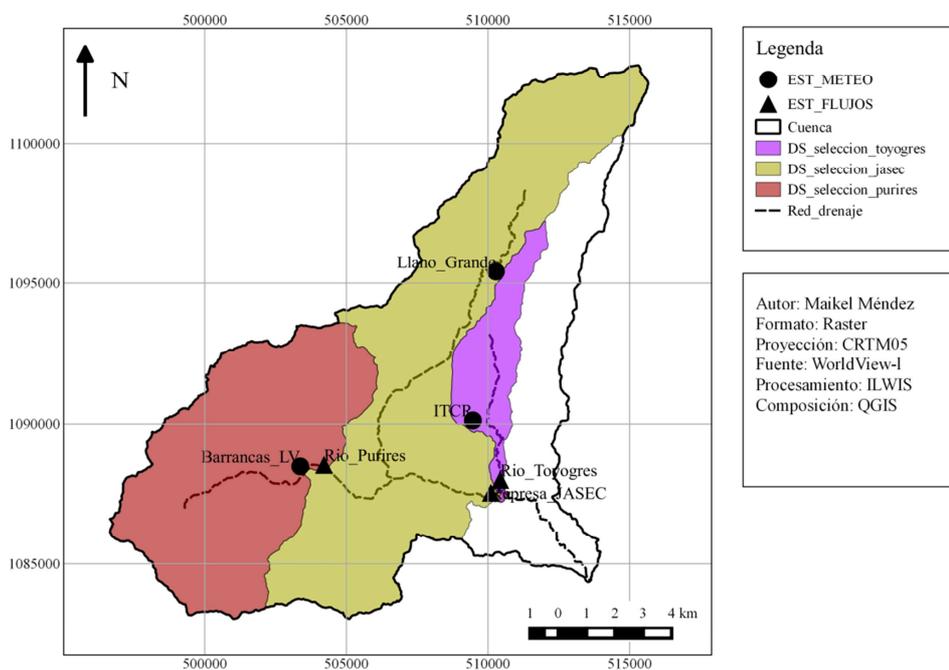


Figura 25. Discretización por subcuenca para la cuenca del río Agua Caliente (*resolución espacial de 10 x 10 m*).

Cuadro 9. Resumen de la caracterización geomorfológica de la cuenca del río Agua Caliente.

Atributo	Valor
Perimetro (m)	80352.27
CatchmentArea (km <sup>2</sup> )	179.75
Longitud total de drenaje (m)	106258.9
DrainageDensity(m/km <sup>2</sup> )	590.91
Mayor longitud de cauce (m)	29411.4
Centroide de la cuenca (E,N)	(507887.20, 1092921.86)
Punto de concentración (E, N)	(513634.70, 1084406.86)
Elevación punto de concentración (msnm)	1074

Cuadro 10. Caracterización geomorfológica de las subcuencas del río Agua Caliente.

Atributo	Agua Caliente (JASEC)	Purires	Toyogres
Perimetro (m)	13650.32	15249	24508.54
CatchmentArea (km2)	54.051	55.93	12.37
Pendiente promedio (%)	18.4	19.85	8.94
Mayor longitud de cauce (m)	2895	3391	7957
Centroide de la cuenca (E,N)	(514300, 1100767)	(506020, 1092337)	(509948, 1092377)
Punto de concentración (E, N)	(510469, 1087550)	(504315, 1088387)	(510469, 1087550)
Elevación punto de concentración (msnm)	1300	1380	1300

## 5.4 Objetivo 4. Modelos hidrológicos

### 5.4.1 Desempeño de modelos hidrológicos

Los resultados (Cuadro 11 y Figura 26) muestran valores de eficiencia  $N_{Seff}$  satisfactorios para la subcuenca del río Purires tanto para el modelo **HBV-TEC** como para el modelo **SWAT** (valores por arriba de 0.80). Es claro sin embargo, que la eficiencia de **HBV-TEC** es aproximadamente un 6% mayor que la del modelo **SWAT**. Lo anterior, sugiere que la estructura matemática del modelo **HBV-TEC** tiende a describir los procesos hidrológicos clave de la subcuenca, de forma superior al modelo **SWAT**. Debe quedar claro, que los primeros 150 días de registros (tanto meteorológicos como flujos) fueron excluidos del proceso de evaluación dado que el modelo **SWAT** requiere de un periodo mínimo de calentamiento. En este sentido, esos 150 registros quedan fuera de todas las funciones objetivo anteriormente mencionadas (ec(3)-(6)). Una de las ventajas del modelo **HBV-TEC**, es que desde el inicio se programaron dos parámetros (variables de estado) orientados a compensar por registros de corta extensión. Estos parámetros ( $fract\_SMi$  y  $fract\_SLZi$ ) son calibrados por **PEST** de forma tal que el contenido inicial de humedad del suelo y almacenamiento en la zona inferior, no requieren periodos de calentamiento extensos como sí los requiere **SWAT**. Esta diferencia en los periodos de calentamiento, puede notarse claramente en el hidrograma de la subcuenca del río Purires (Figura 27), donde por debajo de la línea vertical de calentamiento (línea vertical discontinua), la tendencia modelada por **SWAT** se encuentra considerablemente alejada de la tendencia observada. Caso contrario, la tendencia del modelo **HBV-TEC** es mucho más cercana a los registros observados. Ya sobre bases equitativas, **HBV-TEC** arroja estadísticas de desempeño superiores a **SWAT**. En este sentido,  $LNN_{Seff}$  arroja valores satisfactorios para la subcuenca del Purires en el caso de **HBV-TEC** (0.875) pero insatisfactorios para el modelo **SWAT** (0.752). Lo que esto propone nuevamente, es que la estructura de **HBV-TEC** captura considerablemente mejor los eventos picos (crecidas o flujos bajos) en comparación al modelo **SWAT**. Una de las grandes críticas que se le han hecho a **SWAT** es la gran cantidad de parámetros con los que cuenta su estructura matemática (sobre-parameterización). Esto conlleva a una situación de equifinalidad (Duan et al. 1992; Fang & Ball 2007) o ambigüedad, que a su vez acarrea un serio impacto sobre la incertidumbre de los parámetros del modelo y consecuentemente limita la aplicabilidad del mismo. En este sentido, el modelo **HBV-TEC** sigue una filosofía parsimónica,

la cual busca disminuir el número de incógnitas y mejorar la confiabilidad sobre las predicciones del modelo a través de la restricción de su espacio paramétrico (Beven & Binley 1992).

Por tal razón, el modelo **HBV-TEC** fue concebido como un modelo semi-distribuido, donde se da una discretización de la cuenca en áreas tributarias o subcuencas que compartan características y condiciones similares; tales como cobertura, pendiente, dirección de flujo y área climática.

Cuadro 11. Eficiencia de desempeño de los modelos HBV-TEC y SWAT en subcuencas del río Agua Caliente (2013-2015).

Subcuenca	AguaCaliente (JASEC)		Purires		Toyogres	
	HBV-TEC	SWAT	HBV-TEC	SWAT	HBV-TEC	SWAT
NSeff	0.612	0.594	0.906	0.838	0.780	0.644
LNNSeff	0.640	0.461	0.875	0.752	0.804	0.506
R2	0.693	0.632	0.908	0.843	0.787	0.681
PBIAS	1.270	3.779	2.383	5.177	0.930	1.545
APB	16.201	19.953	16.120	22.311	9.720	15.703

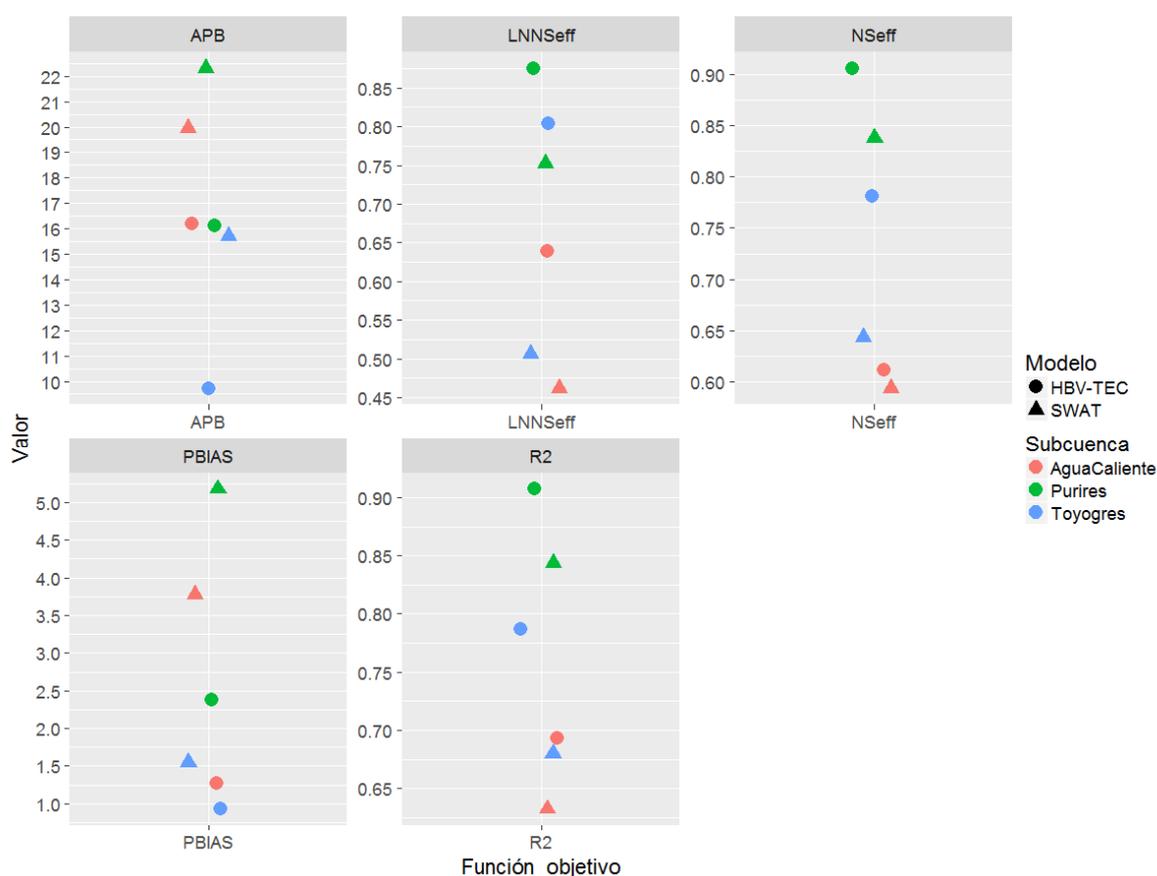


Figura 26. Eficiencia de desempeño de los modelos HBV-TEC y SWAT en subcuencas del río Agua Caliente (2013-2015).

La discretización del modelo **SWAT**, a pesar de ser también semi-distribuida, se ampara en el uso de Unidades de Respuesta Hidrológicas (*HRUs*) las cuales tienden a sobre-discretizar la cuenca en unidades con parámetros propios e independientes, lo que agrava aún más el problema de sobre-parametrización. El coeficiente de correlación **R2**, arroja valores muy similares a los de **NSeff** para la subcuenca del río Purires; satisfactorio en ambos casos. No así para la función **PBIAS** que indica un valor satisfactorio para el modelo **HBV-TEC** (2.383%) pero insatisfactorio para el modelo **SWAT** (5.177%). En esencia, el balance de masas (*balance hídrico*) de **HBV-TEC** es superior al del modelo **SWAT**, aun cuando este último está apenas por encima del valor máximo establecido para este estudio (5%). Este comportamiento se repite también en la función objetivo **APB** para la subcuenca del río Purires, donde el desfase temporal del modelo **HBV-TEC** es satisfactorio (16.120%) pero insatisfactorio para el modelo **SWAT** (22.311%). Independientemente del modelo, el caso de la subcuenca del río Purires parece ser muy particular, en el sentido de que existe buena congruencia entre los registros meteorológicos de entrada (*inputs*), registros de flujos (*outputs*) y las tendencias modeladas por ambos modelos.

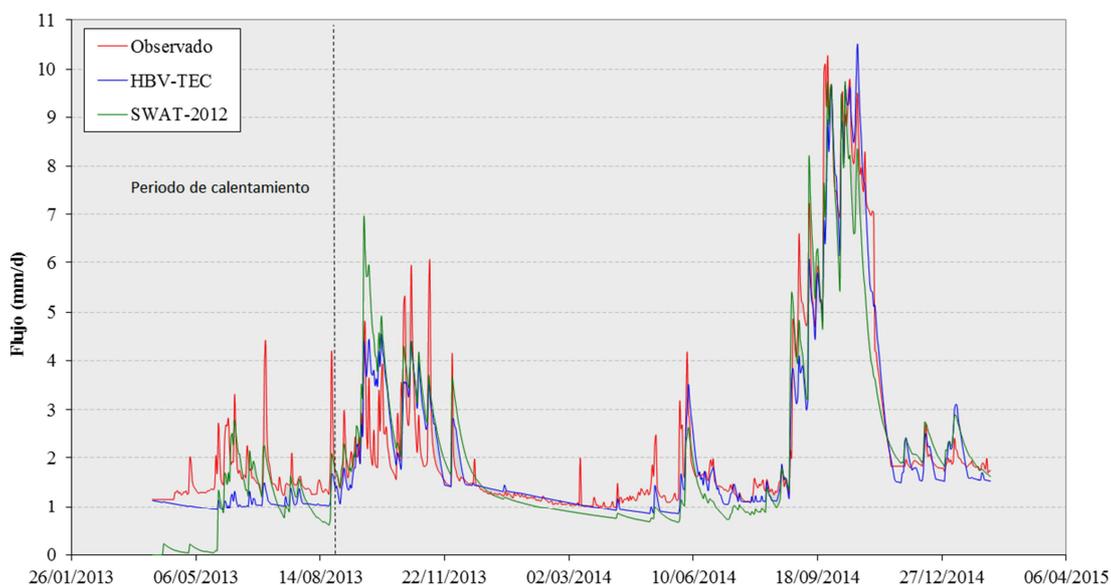


Figura 27. Hidrogramas observados y modelados para la subcuenca del río Purires (2013-2015).

Sin embargo, el buen desempeño general de ambos modelos sobre la subcuenca del río Purires, no se repite para las subcuencas de los ríos Toyogres y Agua Caliente (*JASEC*). En el primer caso, a pesar de que el desempeño de **HBV-TEC** es términos generales superior al modelo **SWAT**, ninguno de los dos arroja valores satisfactorios para la función **NSeff**. En el caso de **HBV-TEC** la eficiencia llega al 0.78, ligeramente inferior a la meta establecida de 0.80. El modelo **SWAT** sin embargo cae por debajo del 65%, lo cual es completamente inaceptable. En el caso de **LNNSeff**, **HBV-TEC** llega a valores satisfactorios (0.804) pero inaceptables para el modelo **SWAT** (0.506). Curiosamente, el balance de masas y el desfase temporal en ambos modelos es incluso superior al caso de la subcuenca del río Purires (*Cuadro 8*). Al examinar más de cerca el hidrograma de la subcuenca del río Toyogres (*Figura 28*), logra verse como ambos modelos son incapaces de adaptarse a los rápidos cambios de nivel (y *consecuentemente de flujo*)

que parecen existir en el río Toyogres. Tal reactividad de la subcuenca, podría explicarse en relación a su alta cobertura urbana (Figura 20) y pendiente, lo cual induciría cambios súbitos en los aportes de escorrentía que ninguno de los dos modelos es capaz de reflejar.

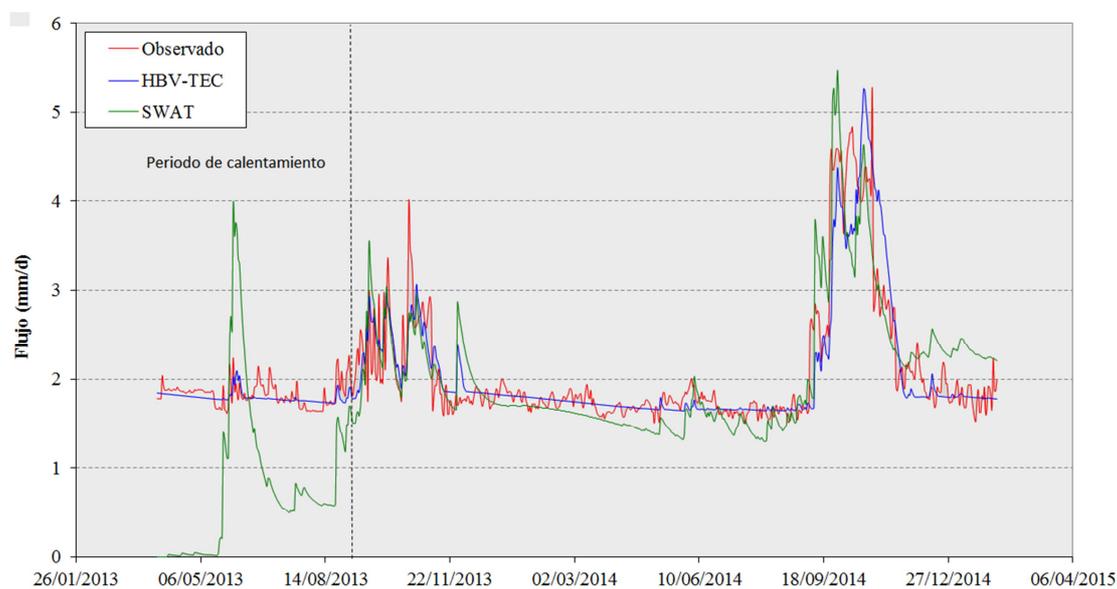


Figura 28. Hidrogramas observados y modelados para la subcuenca del río Toyogres (2013-2015).

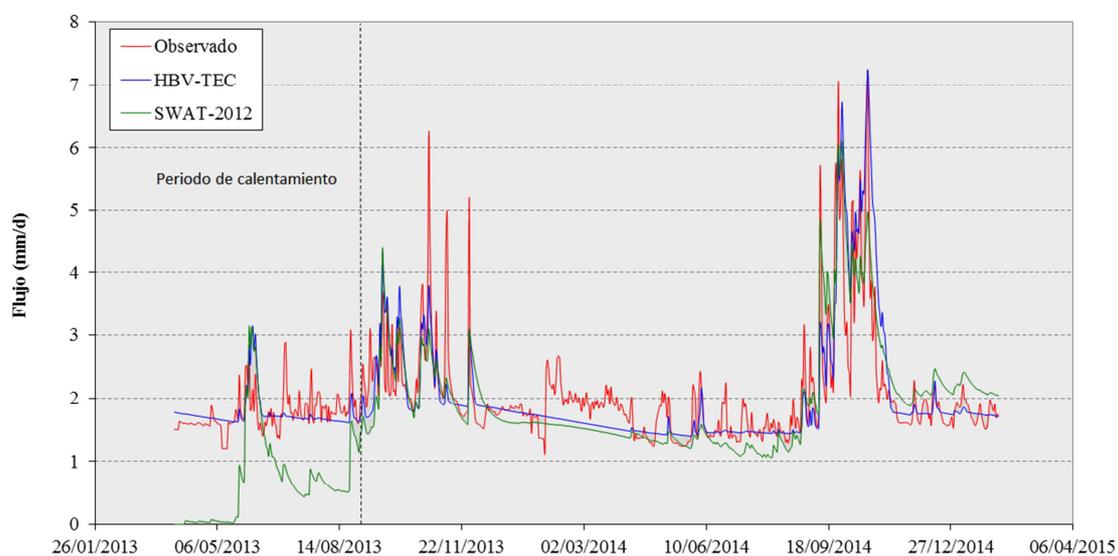


Figura 29. Hidrogramas observados y modelados para la subcuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

Debe recordarse que **HBV-TEC** se basa en una estructura parsimónica conceptual, donde el ajuste de sus parámetros a áreas altamente impermeables podría no ser adecuada. Lo mismo puede decirse sobre la estructura del modelo **SWAT**. Por otro lado, el modelo **SWAT** tiene graves dificultades para describir eventos extremos, ya que en términos generales tiende a sobreestimar picos o a subestimar el flujo base.

Debe reconocerse que en cualquier caso, la extensión efectiva de registros para evaluar ambos modelos a conciencia es considerablemente corta, de apenas 525 días (675 -150 *días de calentamiento*). Bajo cualquier circunstancia, el balance de masa para ambos modelos en la subcuenca del río Toyogres es satisfactorio. El panorama cambio cuantiosamente para la subcuenca del río Agua Caliente a la altura de la represa JASEC, donde el desempeño de ambos modelos es extremadamente pobre, con resultados apenas satisfactorios para las funciones objetivos **PBIAS** y **APB**.

Al analizar detalladamente el hidrograma de subcuenca del río Agua Caliente ([Figura 29](#)) es evidente que una gran parte de los caudales picos que fueron observados sobre la represa de JASEC no son reproducidos por ninguno de los modelos. La hipótesis que toma más fuerza al momento de explicar esta situación, es que las apenas 3 estaciones meteorológicas instaladas en una cuenca de 179 km<sup>2</sup>, son insuficientes para capturar la variabilidad climática de la cuenca como un todo, especialmente en las regiones norte y sur-oeste de la cuenca. Claramente hay picos que ninguna estación meteorológica fue capaz de captar. Es quizás ésta, la mayor limitación que ha enfrentado el proyecto; mantener equipos de campo operando es extremadamente costoso en todo sentido, logístico, capital y humano. Desastrosamente, instalar mayor cantidad de estaciones meteorológicas era prohibitivo en términos del tiempo asignado para la conclusión del cronograma del presente proyecto. Finalmente, tal y como se discutió en la sección de metodología, las observaciones de flujo no están exentas de incertidumbre, ya que los sensores de nivel (y la *subsecuente derivación de flujos a partir de ellos*) se ven afectados por elementos adversos, tales como sedimentación e impactos por escombros. Igualmente, la sección de los cauces es dinámica y la acumulación de basura o modificación de su geometría alteran las curvas de descarga. Como trabajo futuro, se espera poder aplicar los modelos **HBV-TEC** (y *eventualmente SWAT*) a una mayor cantidad de cuencas en el territorio Costarricense.

#### 5.4.2 Optimización paramétrica

En la optimización paramétrica con **PEST**, a cada parámetro de ambos modelos ([Cuadro 1](#) y [Cuadro 2](#)), se le es asignado un valor inicial con sus respectivos valores mínimos y máximos que pueden cambiar durante el proceso de calibración. En este sentido, si bien es cierto a cada parámetro se le asigna el mismo valor inicial, su valor final optimizado final dependerá de las condiciones propias de cada cuenca (o *subcuenca*) y de la calidad de la información disponible para su calibración. En consecuencia, **PEST** realiza un sinnúmero de experimentos numéricos cuyo propósito final es determinar la incertidumbre de cada parámetro en cada modelo. Un parámetro con Intervalos de Confianza amplios, sugerirá una mayor contribución de incertidumbre que uno con Intervalos de Confianza más contraídos. La [Figura 31](#) y el [Cuadro 12](#), muestra los Intervalos de Confianza (CI) al 95% sobre los parámetros óptimos calibrados por **PEST** para el modelo **HBV-TEC** en cada subcuenca del río Agua Caliente. Al concentrarse en los parámetros que gobiernan la función de respuesta (*Response Function Routine*), los coeficientes de recesión  $k_0$  y  $k_1$ , los cuales controlan el almacenamiento en la zona superior (*SUZ*) y consecuentemente el flujo rápido (*picos*), muestran un considerable traslape en los

intervalos de confianza de sus valores óptimos, siendo los de la subcuenca del río Agua Caliente los más extensos. Lo anterior es de esperarse, ya que esta subcuenca es la que presentan mayor discrepancia entre observaciones de flujo, observaciones de precipitación y flujos modelados. En otras palabras, es la que representan mayor nivel de incertidumbre en cuanto a mediciones y observaciones se refiere. Puede notarse una mayor independencia del coeficiente de recesión  $k_2$ , responsable del flujo base, donde no existe zona de traslape alguna. Parece también existir independencia en los parámetros  $\beta$  y  $lp$  de la subrutina de humedad de suelo (*Soil Moisture Routine*), no así en el parámetro  $fc$  (capacidad de campo) que exhibe un traslape considerable y amplios márgenes para todas las subcuencas. Este comportamiento sugiere que existe una profunda dependencia con respecto al estado de humedad antecedente del suelo y los estados de flujo, tanto a nivel de superficie como de transformación, ya que es el parámetro que más varía independiente de la subcuenca.

Cuadro 12. Intervalos de Confianza (95%) sobre parámetros óptimos calibrados por PEST para el modelo HBV-TEC en subcuencas del río Agua Caliente.

Parámetro	Valor Optimo	CI inferior	CI superior	Subcuenca
perc	3.540	3.360	3.720	AguaCaliente
uzl	10.000	6.240	13.760	AguaCaliente
k0	6.497E-02	4.360E-02	9.681E-02	AguaCaliente
k1	1.350E-02	4.322E-04	4.215E-01	AguaCaliente
k2	2.222E-03	1.863E-03	2.650E-03	AguaCaliente
maxbas	1.000	0.804	1.196	AguaCaliente
fc	550.003	477.620	622.385	AguaCaliente
lp	0.335	0.180	0.489	AguaCaliente
beta	0.741	0.629	0.872	AguaCaliente
perc	2.664	2.472	2.857	Purires
uzl	10.000	0.856	20.856	Purires
k0	1.979E-02	4.281E-03	9.146E-02	Purires
k1	4.694E-02	1.879E-02	1.173E-01	Purires
k2	3.798E-03	2.936E-03	4.913E-03	Purires
maxbas	1.000	0.915	1.085	Purires
fc	550.004	456.628	643.380	Purires
lp	1.000	0.891	1.109	Purires
beta	1.503	1.214	1.860	Purires
perc	3.696	3.625	3.768	Toyogres
uzl	10.003	5.674	14.332	Toyogres
k0	1.928E-02	1.109E-02	3.354E-02	Toyogres
k1	9.522E-03	2.086E-03	4.346E-02	Toyogres
k2	8.506E-04	7.189E-04	1.006E-03	Toyogres
maxbas	1.000	0.928	1.072	Toyogres
fc	550.010	490.026	609.995	Toyogres
lp	0.872	0.728	1.016	Toyogres
beta	1.618	1.409	1.857	Toyogres

El comportamiento es muy similar para el parámetro de distribución de peso  $maxbas$ , el cual controla la extensión de la base de la función de transformación (*Transformation Function*),

donde nuevamente los CI son mucho más extensos para la subcuenca del río Agua Caliente que para las otras dos subcuencas. Esto indica una alta incertidumbre sobre la transformación de flujos del modelo **HBV-TEC** por parte de **PEST**, no por incapacidad del modelo, sino más bien por la pobreza de información contenida en los registros meteorológicos, principalmente precipitación, incapaces de reflejar la variabilidad climática de la cuenca. Por otro lado, el parámetro *perc*, que controla la percolación profunda y por ende el flujo base, exhibe valores físicamente plausibles que varía de 2.5 a 4.0 mm/día para cada subcuenca y con suficiente independencia entre ellas. Finalmente, la Figura 30 muestra los histogramas de residuales entre valores observados y modelados por **HBV-TEC** mediante **PEST** en subcuencas del río Agua Caliente (*Agua Caliente -JASEC* (a), *Purires* (b) y *Toyogres* (c)), donde se denota una clara geometría Gaussiana, lo que a su vez sugiere un proceso exitoso de inversión paramétrica y linealización por parte de **PEST**, por lo menos para el modelo **HBV-TEC**.

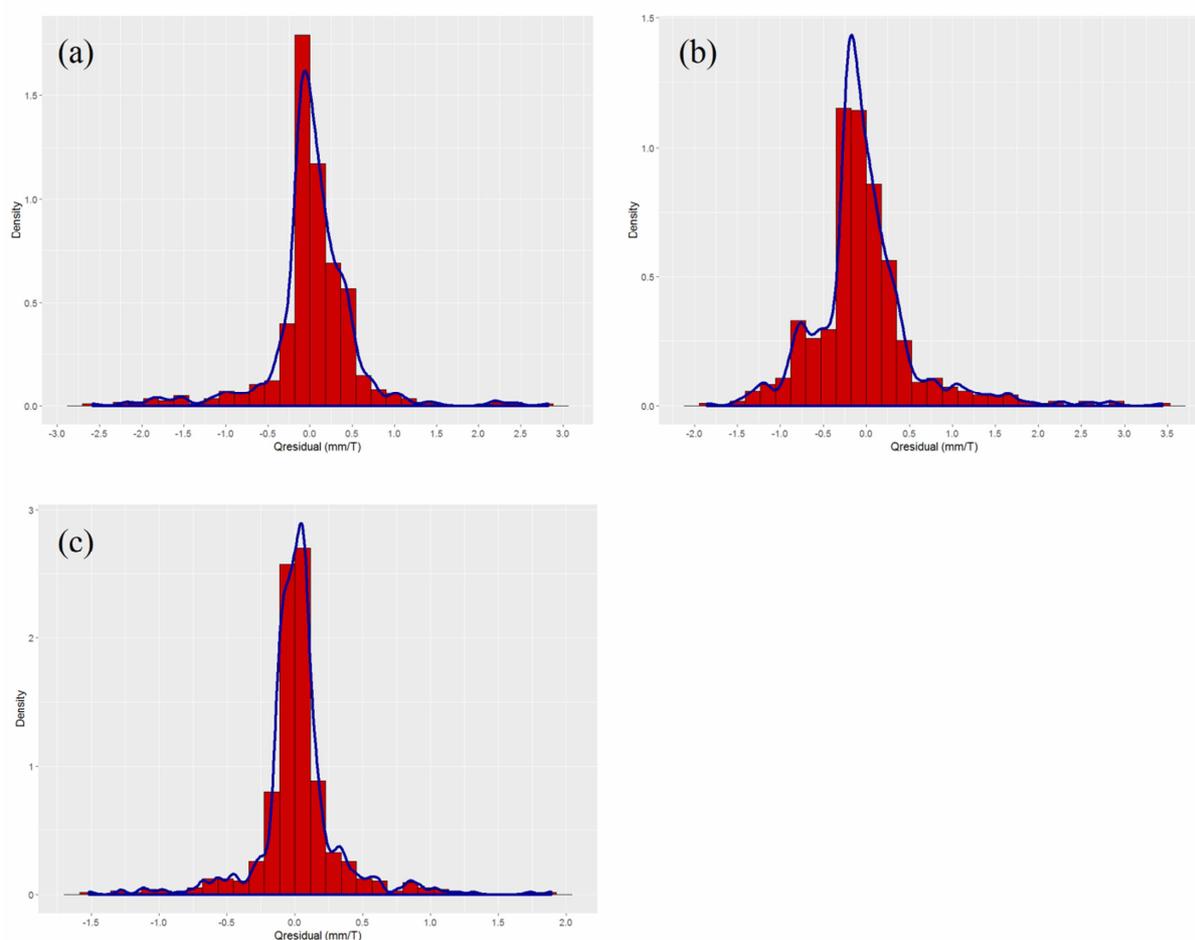


Figura 30. Histogramas de residuales entre valores observados y modelados por HBV-TEC mediante PEST en subcuencas del río Agua Caliente; Agua Caliente -JASEC (a), Purires (b) y Toyogres (c).

En el caso del modelo **SWAT**, el protocolo de optimización y calibración, siguió los mismos pasos del modelo **HBV-TEC**, habiéndose seleccionado parámetros similares (**Cuadro 2**) incluyendo; el número de curva o escorrentía (*runoff Curve Numbers - pcn*), contenido de agua en el suelo (*soil available water capacity - pawc*), coeficiente de compensación de evaporación del suelo (*soil evaporation compensation coefficient - pesco*), coeficiente de retraso de escorrentía superficial (*surface runoff lag - plag*), factor Alpha de flujo base (*Alpha base flow factor - palpha*), coeficiente de retraso de agua subterránea (*groundwater delay - pdelay*), coeficiente de percolación profunda (*deep aquifer percolation coefficient - prdp*) y finalmente el umbral de nivel de agua en acuífero colgante a flujo base (*threshold water level in shallow aquifer for base flow - pgwmin*). Como es de esperarse, estos parámetros difieren en estructura, dimensiones y objetivo de aquellos que componen la estructura del modelo **HBV-TEC** (**Cuadro 1**). Sin embargo, se trató en la medida de lo posible, que representasen procesos similares o comparables entre ambos modelos. Al iniciar con *pcn*, puede verse que los números de curva de las subcuencas de los ríos Agua Caliente y Toyogres poseen valores medianos muy similares (**Figura 31 y Cuadro 13**), en el orden de 70.

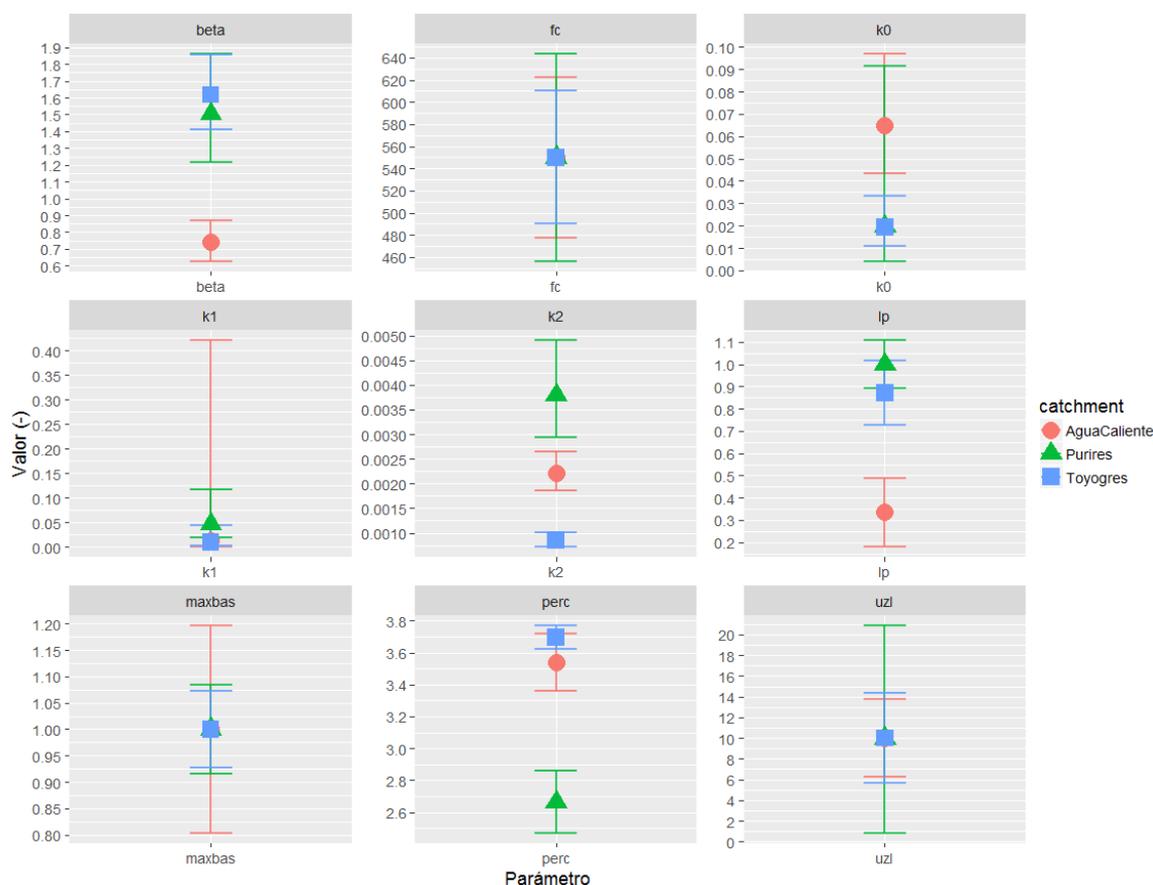


Figura 31. Intervalos de Confianza (95%) sobre parámetros óptimos calibrados por PEST para el modelo HBV-TEC en subcuencas del río Agua Caliente.

Lo anterior, denota gran porcentaje de área impermeable; tal y como lo demostró el estudio de clasificación (Figura 20). Por otro lado, en el caso de la subcuenca del río Purires se alcanzan valores mucho más permeables del número de curva (*en el orden de 80*), lo cual es congruente con un menor porcentaje del área cubierto por uso urbano. Los parámetros *plag* y *pdelay*, que controlan la transformación de escorrentía superficial y escorrentía subterránea, alcanzan valores muy similares en el caso del primero (*medias de entre 0.10 y 0.12 días*), mientras que para el segundo, existen valores considerablemente disimilares para la subcuenca del Purires. Nuevamente, esto sugiere coberturas altamente impermeables en las subcuencas del Toyogres y Agua Caliente. Las pérdidas por percolación profunda *prdp*, alcanza en todos los casos valores estables que varían de 0.001 a 0.01 mm/día, siendo la subcuenca del río Agua Caliente la que alcanza los valores más altos.

Cuadro 13. Intervalos de Confianza (95%) sobre parámetros óptimos calibrados por PEST para el modelo SWAT en subcuencas del río Agua Caliente.

Parámetro	Valor Optimo	CI inferior	CI superior	Subcuenca
pcn	71.206	69.815	72.597	AguaCaliente
pawc	0.010	0.005	0.015	AguaCaliente
pesco	0.122	-0.116	0.360	AguaCaliente
plag	0.121	0.100	0.143	AguaCaliente
palpha	0.007	0.006	0.008	AguaCaliente
pdelay	107.298	94.609	119.987	AguaCaliente
prdp	0.011	0.003	0.043	AguaCaliente
povn	0.016	-0.037	0.069	AguaCaliente
pgwmin	625.210	512.672	675.227	AguaCaliente
pcn	81.425	80.135	82.715	Purires
pawc	0.011	-0.025	0.046	Purires
pesco	0.371	-0.114	0.856	Purires
plag	0.100	0.088	0.112	Purires
palpha	0.004	0.004	0.005	Purires
pdelay	4.772	-0.310	9.854	Purires
prdp	0.003	0.000	0.046	Purires
povn	0.600	0.444	0.756	Purires
pgwmin	701.870	498.328	786.094	Purires
pcn	70.000	68.897	71.103	Toyogres
pawc	0.097	0.082	0.113	Toyogres
pesco	0.990	0.911	1.069	Toyogres
plag	0.100	0.090	0.110	Toyogres
palpha	0.007	0.005	0.009	Toyogres
pdelay	115.307	81.618	148.995	Toyogres
prdp	0.001	0.000	1377.125	Toyogres
povn	0.600	0.483	0.717	Toyogres
pgwmin	752.880	715.236	801.817	Toyogres

El parámetro *palpha*, que en buena medida controla la producción de flujo base, alcanza valores muy estables en las tres subcuencas. No obstante, llama la atención la distribución del parámetro *pawc*, que controla el contenido de agua en el suelo, donde el caso de la subcuenca del Toyogres

alcanza valores muy alejados en relación a las otras dos subcuencas (*prácticamente un orden de magnitud*). Esto apunta más a un problema de compensación paramétrica que a una diferencia física real, probablemente causado por la pobreza de las series de datos de observación. Por otro lado, el umbral de nivel de agua en acuífero colgante a flujo base (*pgwmin*) alcanza valores plausibles de entre 625 y 753 mm, pero con intervalos de confianzas extremadamente altos para subcuenca del Purires. Esto también se refleja en el parámetro *pesco*, responsable de compensación de evaporación del suelo, donde los CI para la subcuenca del Purires son considerablemente más extensos que los de las demás subcuencas. Esto denota que ambos parámetros contribuyen considerablemente a la incertidumbre general de las predicciones del modelo, aun cuando es precisamente la subcuenca del Purires, la que alcanza mayores eficiencias. En términos globales, ambos modelos presentan interdependencia entre varios de sus parámetros y existe en muchos casos, una marcada diferenciación entre sus valores medios y sus intervalos de confianza. También, en muchos parámetros, se presentan amplios intervalos de confianza que sugieren una alta contribución de incertidumbre sobre las series modeladas. Que tanto de estas contribuciones se deben a la insuficiencia de los registros de campo y cuanto a la estructura de cada modelo es difícil de saber con tan solo 675 días de datos.

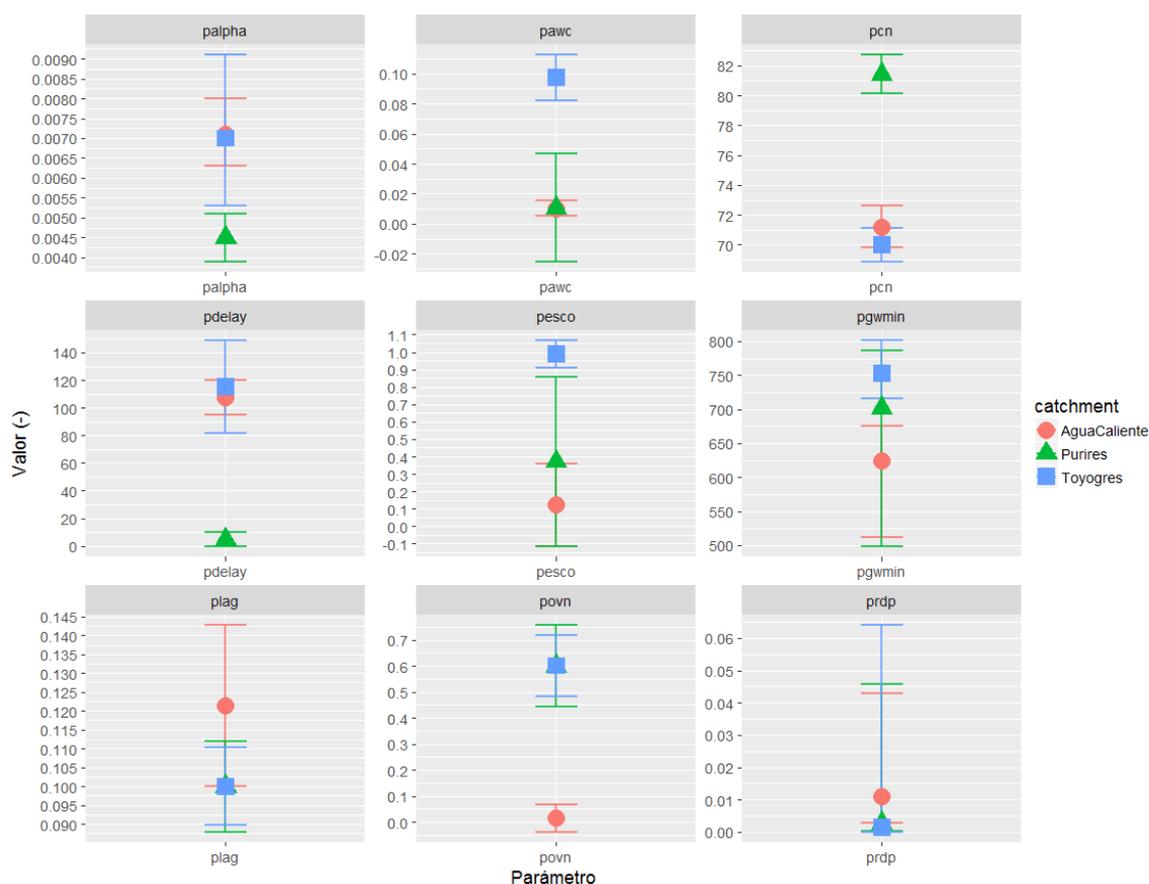


Figura 32. Intervalos de Confianza (95%) sobre parámetros óptimos calibrados por PEST para el modelo SWAT en subcuencas del río Agua Caliente.

### 5.4.3 Tendencia de los modelos hidrológicos al sesgo

El sesgo es un término comúnmente utilizado para describir la tendencia de un modelo a presentar errores (desviaciones). Para este estudio en específico, existen fuentes de incertidumbre que estarían sesgando los resultados. Esto involucra ambos modelos hidrológicos (*HBV-TEC* y *SWAT*) e incluye los parámetros propios y funciones de cada modelo, así como los datos de entrada y datos de calibración utilizados. Durante el análisis de los resultados y el desarrollo del proyecto, fue posible identificar tres principales fuentes de incertidumbre:

- Los datos de entrada. Costa Rica tiene una gran cantidad de microclimas, cada uno de ellos se asocia con características geomorfológicas y meteorológicas, que les son características y que implican un alto grado de complejidad. Esta no es la excepción en el caso de la cuenca del río Agua Caliente. En consecuencia, se evidencia una carencia de información implícita en las series de precipitación que no logran representar correctamente su distribución espacial y temporal. En este sentido, la densidad y distribución espacial de las estaciones meteorológicas. Pocas estaciones o una distribución asimétricas de las mismas, puede omitir importantes eventos de precipitación, especialmente aquellos que generan caudales (*flujos*) pico.
- El método de interpolación espacial de la lluvia. El único método de interpolación de la precipitación contemplado fue el del Inverso del Peso de la Distancia (*Inverse Distance Weighting IDW*) con una potencial exponencial de 3. El método asume se asume adecuado para zonas montañosas y con pendientes elevadas, lo cual podría no ser cierto. Lo ideal, sería aplicar un modelo de interpolación espacial geoestadístico, como *Kriging*, donde se distribuya y normalice la precipitación tomando en cuenta la geomorfología, altitud y pendientes. De esa forma, podría dársele un sentido más físico a la misma y no que sea distribuida uniformemente dentro de un área de influencia. Para esto, es necesario densificar uniformemente la red de muestreo meteorológica, lo cual es a su vez prohibitivo desde el punto de vista financiero y logístico.
- La ubicación de las estaciones de aforo. Con el propósito de discretizar una cuenca tan grande como la del río Agua Caliente, es evidente que se necesitan más de tres estaciones de flujo. Sin embargo, el costo de estas es elevado y su mantenimiento complejo. Si bien es cierto en este proyecto, todos los sensores de nivel se instalaron al lado de puentes (por razones de seguridad del personal), esta no es necesariamente la mejor ubicación de los mismos. Lo anterior, dado que los sensores están expuestos a transitorios hidráulicos (a la entrada y salida de la estructuras) que si bien es cierto son representativas de los que sucede en los puentes, no necesariamente son representativas del cauce *per se*. Consiguientemente, este tipo de equipos, su instalación y mantenimiento, deberían ser subcontratados a profesionales en el campo, lo cual garantizaría una mejor calidad de la información y un menor riesgo para los investigadores.

### 5.5 Objetivo 5. Balance hídrico

En relación al análisis del balance hídrico de las subcuencas estudiadas, se decidió proceder con el mismo, utilizando únicamente las salidas del modelo **HBV-TEC**. Lo anterior, dado que el modelo SWAT tuvo un desempeño menor en términos generales.

El Cuadro 14, muestra un resumen de las componentes más importantes del balance de masas (*balance hídrico*) en las subcuencas estudiadas del río Agua Caliente de acuerdo al modelo **HBV-TEC**, tomando en cuenta todo el periodo de modelación. En este sentido y de habiendo resuelto la ecuación de conservación de masa del modelo **HBV-TEC** (ec. (2)), se obtuvieron los volúmenes de almacenamiento, los cuales se traducen en recargas y flujo subterráneo principalmente. La precipitación total (*outPREC*) en cada una de las subcuencas es de hecho muy similar entre sí, variando desde 2232 mm para la subcuenca del Toyogres hasta 2433 mm para la subcuenca del río Purires. Dicha variación, obedece especialmente al esquema de interpolación espacial de la precipitación (*Inverse Distance Weighting ID, con una potencial exponencial de 3*) entre las estaciones disponibles (Figura 25) y la resolución espacial elegida (10 x 10 m), aunado a la variabilidad propia de distribución de la precipitación en la zona.

En cuanto a la evapotranspiración real (*outAET*), ésta depende de las condiciones de uso del suelo, de la disponibilidad de agua por precipitación y de la capacidad de retención de humedad del suelo, así como de las condiciones climáticas imperantes en la zona. Puede notarse un valor particularmente alto de *outAET* para la subcuenca Agua Caliente (*JASEC*) en relación a las otras dos subcuencas. Es muy probable, que esto se deba al gran porcentaje de área cubierto por suelo en preparación (*suelo desnudo*) y cultivos presentes en la zona norte de la cuenca (Figura 20), la cual de paso concentra la mayoría de esos usos de suelo. Las prácticas de rotación de terreno y la exposición de suelo desnudo, potencian una mayor evapotranspiración en relación a un suelo cubierto por vegetación. También ha de tomarse, el gran porcentaje de área urbana que presenta esta subcuenca. En relación a la escurrentía total o caudal observado (*outQOBS*), la subcuenca del río Purires, es la que presenta un mayor volumen producido de 1504 mm. Nuevamente, esto se debe a condiciones de escurrentía más favorables (Figura 31) en comparación a las otras dos subcuencas, dado que la tasa de escurrimiento superficial es mayor y la precipitación es también mayor (2433 mm).

Cuadro 14. Resumen del balance de masas (*para todo el periodo*) en subcuencas del río Agua Caliente de acuerdo al modelo HBV-TEC.

Subcuenca	Componentes del balance en el periodo (mm)			
	outPREC	outAET	outQOBS	Almacenamiento
Purires	2433.33	655.81	1503.91	273.61
Agua Caliente (JASEC)	2318.06	843.04	1355.20	119.82
Toyogres	2232.18	675.63	1373.09	183.46

En cambio en el almacenamiento, el cual representa esencialmente la recarga de acuíferos, varía significativamente entre cada una de las subcuencas. Lo anterior se debe, a la unión de factores orográficos, geomorfológicos, de tipo de suelo y cobertura del terreno que existen en cada subcuenca. Así por ejemplo, es de esperarse que la subcuenca del río Agua Caliente (*JASEC*) exhiba el valor más bajo de recarga (120 mm) ya que es la cuenca con mayor porcentaje de área

urbana, mientras que la subcuenca del río Purires ostenta el valor más alto (274 mm); igualmente relacionada a una menor concentración de área urbana. De toda suerte, los valores son positivos en todo caso, lo cual garantiza que existe recarga subterránea y no existe déficit hídrico en ninguno de los casos. Es importante mencionar que los resultados obtenidos, representan la sumatoria de un periodo de muestra muy corto (675 días) y que los valores individuales de cada año pueden variar dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten. En años donde se presente el fenómeno ENOS, o sequías, estos cambios de almacenamiento, podrían ser menores a los obtenidos. Por lo tanto, es necesario contar con registros históricos mucho más robustos. Por otro lado, con el fin de contar con datos de recarga acuífera más confiables, es necesario profundizar en un análisis hidrogeológico que incluya una modelación (y monitoreo) de los acuíferos, lo cual va mucho más allá de los objetivos de este proyecto. Las Figuras 33 y 34, muestran el balance de masas desagregado en las subcuencas estudiadas del río Agua Caliente de acuerdo al modelo **HBV-TEC** para todo el periodo, en términos absolutos y unitarios. Como puede notarse, el residual entre los caudales para el periodo ( $outQRES$ ) es relativamente bajo en todas las subcuencas, dado que los caudales observados ( $outQOBS$ ) son muy similares a los caudales simulados ( $outQSIM$ ). Valores positivos de  $outQRES$  implican una subestimación por parte del modelo, mientras que valores negativos indican una sobrestimación.

Esto sugiere una alta adaptabilidad por parte del modelo **HBV-TEC** para generar balances hídricos confiables. Otro aspecto a resaltar, es el hecho de que gran parte de la precipitación de entrada ( $outPREC$ ) se convierte en escorrentía subsuperficial o flujo base ( $outQ2$ ), variando de 0.39 a 0.53 como fracción. En otras palabras, de la precipitación total de entrada, del 39% al 53% se termina convirtiendo en flujo base. Llama la atención también, que la componente de flujo de escorrentía en la zona superior ( $outQ0$ ) que corresponde al flujo rápido, alcanza valores relativamente bajos, variando 4.8% al 7.7% aun con pendientes altas. Lo anterior, va de la mano con el régimen de precipitación, en un periodo relativamente seco, con volúmenes de precipitación diaria por debajo de 10 mm/día y un máximo de 65 mm/día para el mes de Septiembre de 2014. Queda claro, que la evapotranspiración es un componente importante del balance de masas general, con valores que van del 27% al 36%.

### **5.6 Objetivo 6. Indicadores hidrológicos**

En relación a los indicadores climáticos e hidrológicos mencionados en la sección de metodología; aun cuando éstos son relativamente simples de medir y derivar, los mismos requieren de periodos de observación extensos que permitan analizar tendencias o patrones a través del tiempo bajo el contexto del análisis estadístico. En este sentido, 675 días es un periodo de tiempo extremadamente corto, máxime que en general, se requieren al menos 20 años de registros continuos, que permitan evaluar estos indicadores en diversas escalas temporales (*mensuales, estacionales, anuales*). En cuanto a los índices de disponibilidad, éstos pudieron ser derivados, aunque son representativos de un único espacio en el tiempo ([Cuadro 15](#)). Puede verse como el DPCA indica que en términos de la población, la cuenca del río Agua Caliente experimenta escasez de agua. Lo anterior no es sorpresa, ya que lo que a agua potable se refiere, los municipios involucrados deben importar agua desde otras cuencas externas (*acueducto Orosi por ejemplo*). Esta escasez aparente va estrictamente en relación a la densidad de población y tiene poco que ver con las condiciones hidrológicas naturales que imperan en la cuenca. Prueba de ello, es la clasificación derivada a partir del índice de aridez, la cual ubica a la cuenca en una

categoría de clima húmedo. De nuevo, se trata de una cuenca húmeda cuya demanda es muy cercana a la oferta. Finalmente, tal y como se mencionó con anterioridad, el único sector al que se le pudo cuantificar la demanda, fue al sector eléctrico, ya que JASEC demanda el 65% de la oferta hídrica de la cuenca para generación eléctrica. En relación a otros sectores como agua potable y agricultura, las aguas del río Agua Caliente y la mayoría de sus tributarios, se encuentran altamente contaminados, lo cual hace impráctico su explotación para estos sectores (ANEXO 8).

Cuadro 15. Resumen de los índices de disponibilidad para la cuenca del río Agua Caliente (2013-2015).

Índice	Unidades	Valor	Categoría
Índice de disponibilidad per cápita de agua (DPCA)	m <sup>3</sup> /persona/año	774.6	Se experimenta escasez de agua
Índice de aridez	adimensional	1.4	Clima húmedo
Índice de escasez	%	65.0	Utilización en generación eléctrica

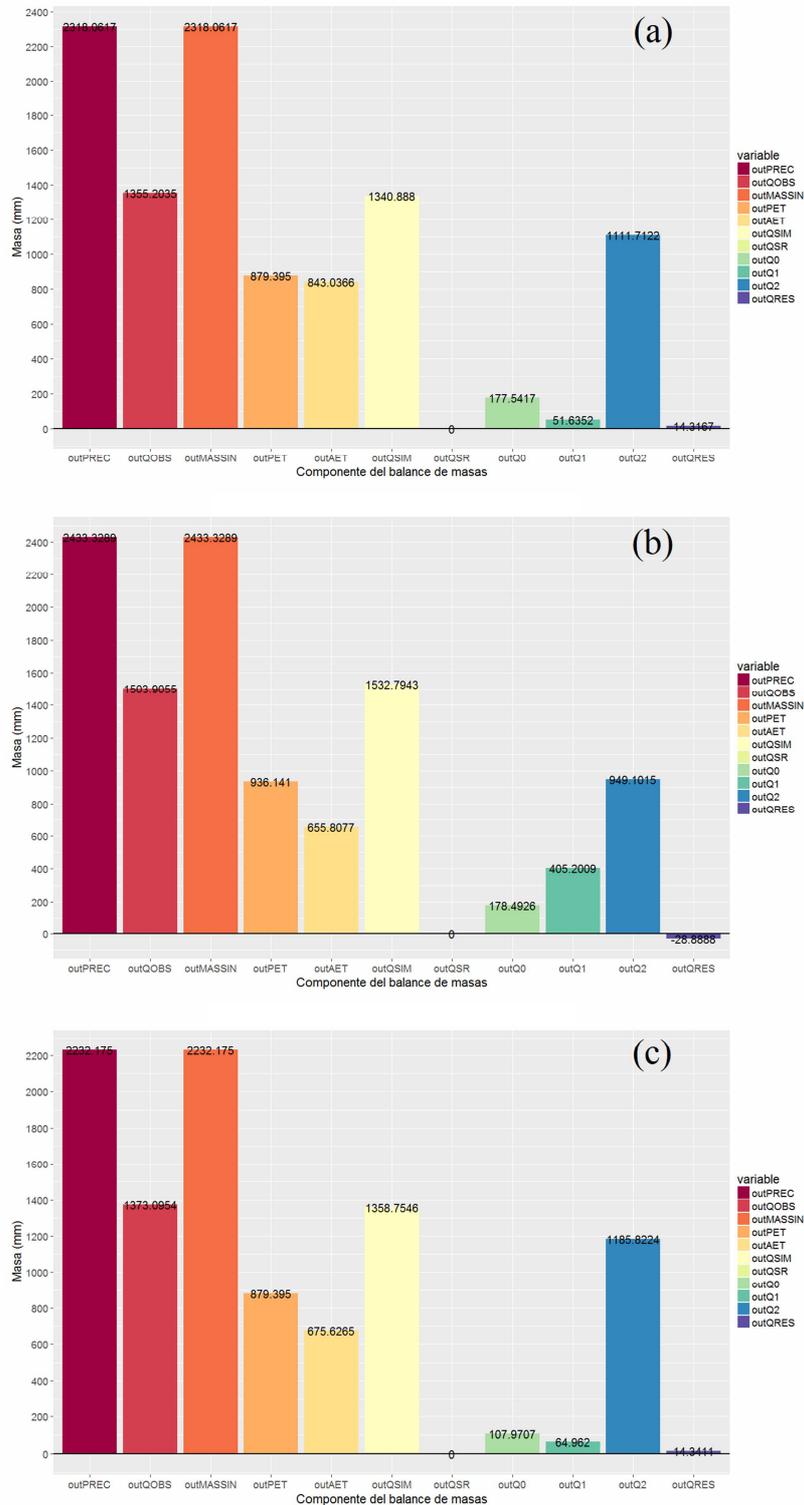


Figura 33. Balance de masas (para todo el periodo) en subcuencas del río Agua Caliente de acuerdo al modelo HBV-TEC. (Agua Caliente -JASEC (a), Purires (b) y Toyogres (c)).

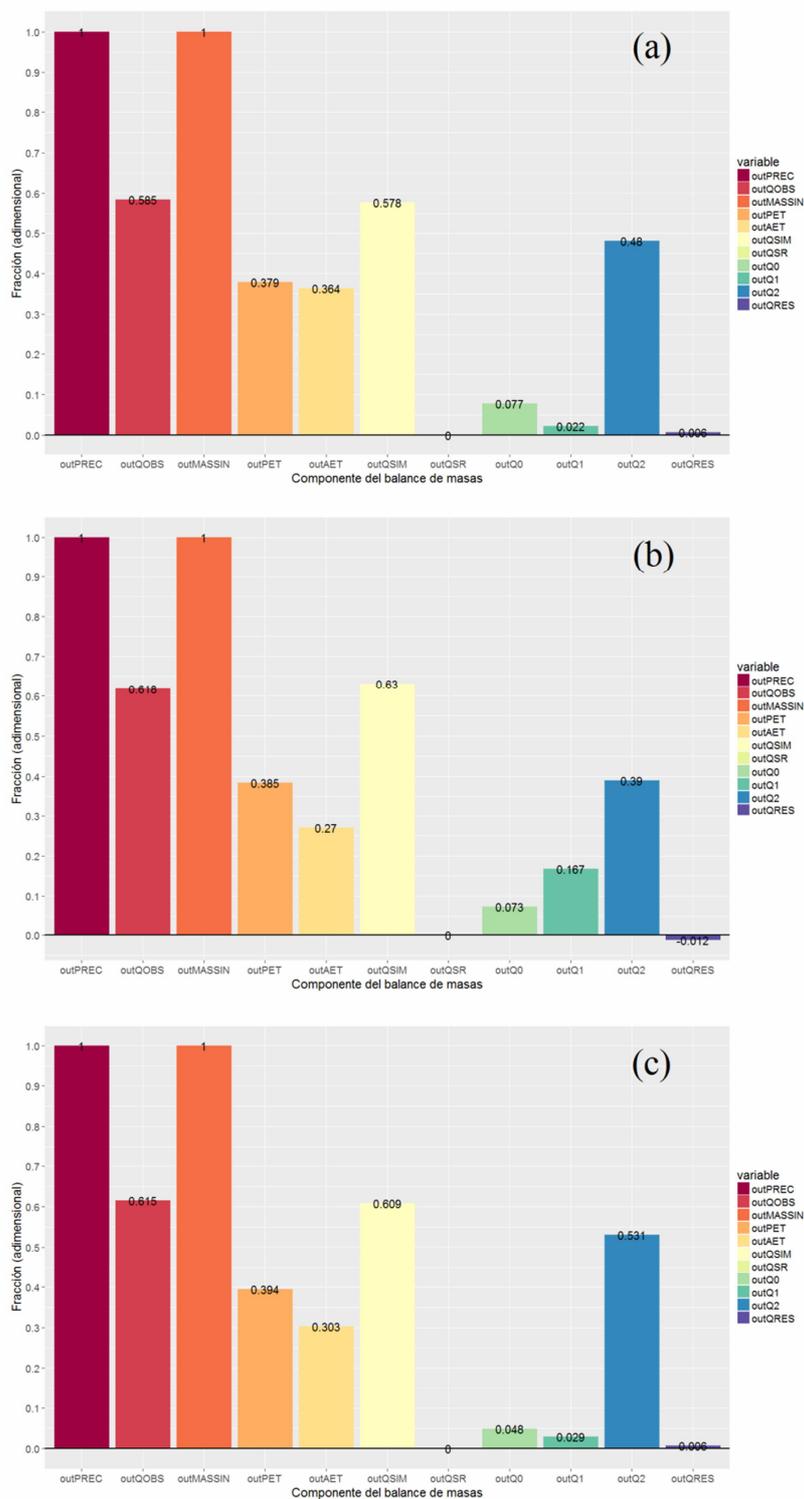


Figura 34. Balance de masas-unitario (para todo el periodo) en subcuencas del río Agua Caliente de acuerdo al modelo HBV-TEC. (Agua Caliente -JASEC (a), Purires (b) y Toyogres (c)).

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En su formulación, este proyecto tuvo como objetivo general evaluar cuantitativa, espacial y temporalmente, los recursos hídricos de la cuenca del Río Agua Caliente mediante la construcción y análisis de balances hídricos. Dicho objetivo fue cumplido a cabalidad. A continuación se listan las conclusiones y recomendaciones (*por objetivo*) más relevantes.

### 6.1 Objetivo 1. Instrumentación de campo

- Se logró la instalación y seguimiento de tres estaciones meteorológicas y tres estaciones de flujo que registraron datos durante un periodo de 675 días.
- Se considera que tras estaciones meteorológicas son pocas para describir la variabilidad climática de una cuenca en el orden de 179.75 km<sup>2</sup>.
- El mantenimiento general de equipos en el campo es altamente costoso desde el punto de vista de capital humano.
- La tecnología utilizada para medir niveles en los ríos (*transductores de presión HOB0*), presentó diversos problemas, por lo que sería deseable acudir a otro tipo de tecnologías que trabajen a distancia. Lo anterior, ya que estos sensores están a merced de sedimentación, golpes e incluso pérdida de los equipos durante labores de limpieza y dragado.
- La determinación de las curvas de calibración de los cauces, debería ser subcontratada, dada la alta peligrosidad de estas labores.

### 6.2 Objetivo 2. Mapas de uso del suelo

- Se desarrollaron mapas de uso del suelo mediante la clasificación de imágenes multi-espectrales del satélite WorldView-I tomadas en 2011.
- Para fines de modelación hidrológica solo se consideraron los seis usos más relevantes.
- El uso dominante en la cuenca es *Urbano\_Alterado* con un 41.05% del área total cubierta, lo cual tiene un profundo impacto en los procesos hidrológicos y de calidad de agua de la cuenca.
- Dichos mapas fueron utilizados en la parameterización de los modelos hidrológicos **HBV-TEC** y **SWAT**.
- Se recomienda probar nuevas tecnologías de clasificación de imágenes con algoritmos recientes de identificación y clasificación por textura.
- Debe quedar claro que estas imágenes fueron tomadas en 2011 y tan solo representan un instante en el tiempo.
- Las imágenes crudas WorldView-I pueden ser utilizadas en otros estudios.

### 6.3 Objetivo 3. Modelos de elevación de terreno

- Un modelo de elevación digital (*DEM*) con una resolución de 10 x 10 fue creado para toda la cuenca con base a imágenes estéreo del satélite WorldView-II.
- El DEM generado tuvo una precisión de RMSE de 1.689 m y contó con una red de 42 puntos de control en terreno de primer orden (*GCPs*).
- A partir del DEM, se derivaron los mapas de pendiente y aspecto donde se denota que la cuenca presenta gran porcentaje de un área bajo condiciones que van desde *inclinado* hasta *escarpado*, con orientaciones predominantes Sur (20.65%), Oeste (15.77%), Este (14.35%) y Sur-Oeste (13.14%), lo que favorece la concentración de flujo hacia el centro de la cuenca y con descarga Sur-Este.
- Estos últimos mapas fueron igualmente utilizados en la extracción de atributos a nivel de subcuenca y de la determinación de sus parámetros mediante hidroprocesamiento.
- Dado que las imágenes WorldView-II son de mucha mayor resolución, se recomienda probar resoluciones espaciales más altas y más bajas a las utilizadas y evaluar el impacto de estas en términos de modelación hidrológica.
- Las imágenes crudas WorldView-II pueden ser utilizadas en otros estudios.

### 6.4 Objetivo 4. Modelos hidrológicos

- El modelo **HBV-TEC** incorpora la alta capacidad gráfica y estadística del lenguaje de programación **R**, lo que lo hace altamente flexible.
- En términos generales, el modelo **HBV-TEC** (*desarrollado durante la ejecución de este proyecto*) demostró un desempeño superior al modelo **SWAT** en términos de las funciones objetivo utilizadas (*NSeff*, *LNNSeff*, *R2*, *PBIAS* y *APB*).
- El modelo **SWAT**, a pesar de ser un modelo físicamente basado (*mayoritariamente*), es un modelo sobre-parameterizado, lo cual contribuye grandemente a su menor desempeño en relación a un modelo parsimonioso como el **HBV-TEC**.
- Queda claro que existe alta incertidumbre en la determinación del set de parámetros óptimo de cada modelo, pero el modelo **SWAT** se ve más fuertemente afectado por esta situación.
- El desempeño se considera satisfactorio para las subcuencas de los ríos Purires y Toyogres (*este último solo para el modelo HBV-TEC*) pero insatisfactorio para la subcuenca del río Agua Caliente (*JASEC*), lo cual se atribuye a la insuficiencia de la red meteorológica de captar la variabilidad climática de la cuenca como un todo.
- las observaciones de flujo no están exentas de incertidumbre, ya que los sensores de nivel se ven afectados por elementos adversos, tales como sedimentación e impactos por escombros.
- La optimización paramétrica ejecuta por **PEST** se considera satisfactoria con base en el análisis estadístico de los residuales; los cuales confirman un exitoso proceso de inversión y linealización.

- Las tres principales fuentes de incertidumbre que empujan a los modelos hidrológicos al sesgo son: los datos de entrada, el método de interpolación espacial de la lluvia y la ubicación de las estaciones de aforo.
- Se recomienda evaluar otras metodologías de interpolación espacial de información meteorológica.
- Se recomienda seguir con el desarrollo del modelo **HBV-TEC**, lo cual incluye la aplicación y calibración del mismo en variedad de cuencas (AyA), la incorporación de rutinas de regionalización para cuencas no instrumentadas, la adición de nuevas rutinas de optimización (*además de PEST*) y el desarrollo de una versión raster totalmente distribuida.

### 6.5 Objetivo 5. Balance hídrico

- El modelo **HBV-TEC** demostró una alta adaptabilidad para generar balances hídricos confiables en cuencas con datos limitados y alta variabilidad geomorfológica, aun con las limitaciones de sesgo hidrológico identificadas.
- De la precipitación total de entrada en la cuenca del río Agua Caliente, entre 39% y 53% se termina convirtiendo en flujo base, mientras que el flujo base alcanza valores relativamente bajos, variando 4.8% al 7.7% aun con pendientes inclinadas y escarpadas.
- La evapotranspiración es un componente importante del balance de masas general, con valores que van del 27% al 36%.
- Los volúmenes de almacenamiento van desde 119.82 hasta 273.61 mm en el periodo, lo que se traduce directamente en recarga profunda de acuíferos.

### 6.6 Objetivo 6. Indicadores hidrológicos

- Los indicadores climáticos e hidrológicos; aun cuando son relativamente simples de medir y derivar, se requieren de periodos de observación extensos que permitan analizar tendencias o patrones a través del tiempo bajo el contexto del análisis estadístico, lo cual no se puede conseguir con un periodo de tan solo 675 días.
- Según el índice de disponibilidad per cápita de agua (DPCA), la cuenca del río Agua Caliente experimenta escasez de agua.
- Según el índice de aridez, la cuenca del río Agua Caliente se clasifica como clima húmedo.
- Según el índice de escasez, la cuenca del río Agua Caliente experimenta una alta demanda, con el 65% de la oferta consumida en generación eléctrica por parte de JASEC.
- Se recomienda aplicar estos índices a cuencas con registros históricos más extensos.

## **7 AGRADECIMIENTOS**

El autor agradece todo el apoyo brindado por parte del Consejo de Escuela de la Escuela de Ingeniería en Construcción durante la ejecución de este proyecto. De la misma forma, agradecer el respaldo de las Vicerrectorías de Docencia e Investigación. Particular agradecimiento a los técnicos Juan Carlos Coto y Heiner Navarro por su apoyo en labores de campo.

## 8 REFERENCIAS

- Arabi, M., Govindaraju, R.S., Hantush, M.M. 2007. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practice. *J. Hydrol.* 333, 459-471.
- Arnold J.G, Williams J.R, Griggs R.H, Sammons N.B. 1990. SWRRB—A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management. Texas A&M Press: Texas.
- Bahremand, A., de Smedt, F. 2010. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. *J. Wat. Res. Mngmnt.* 24 (12), 2869-2880.
- Bergström, S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI RH07, Norrköping, Sweden.
- Bergström, S. 1995. The HBV model. In: Singh VP (ed) *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 443–476.
- Booij M.J. 2005. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *J Hydrol* 303: 176-198.
- Beven, K.J., Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Process.* 6, 279-298.
- Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). 2008. Sistema de Indicadores de Estado Hidrológico en España, Tema B: Hidrología y Gestión del Agua. Madrid.
- Christensen, S., Doherty, B. 2008. Predictive error dependencies when using pilot points and singular value decomposition in groundwater model calibration. *Adv. Water Resour.* 31 (2008), 674-700.
- Cuartero, A., Felicísimo, A.M., Ariza, F.J., 2004. Accuracy of DEM Generation from Terra-ster Stereo Data, XXth ISPRS Congress. *Geo-Imagery Bridging Continents*, Istanbul, Turkey, pp. 559.
- Dirección general de salud ambiental e inocuidad alimentaria (DIGESA), Ministerio de Salud, Perú. 2010. Estándares de calidad ambiental del agua, Grupo n° 4: conservacion del ambiente. Lima, Perú.
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models. *Water Resour Res* 24: 1163-1173.
- Doherty, J. 2005. PEST: model independent parameter estimation Users Manual. Watermark Numerical Computing, Brisbane.

Easton, Z.M, Fuka, D.R., Walter M.T., Dillon, M., Cowan, M. Elliot, E., Schneiderman, M., Tammo, S., Steenhuis, A. 2008. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. *J. Hydrol.* 348, 279-291.

Fang T, Ball J.E. 2007. Evaluation of spatially variable control parameters in a complex catchment modelling system: a genetic algorithm application. *J Hydroinf* 9:163-174.

Falkenmark, M. M., Lindh, G. 1974. Impact of Water Resources on Population. UN World  
Forte, F. Strobl, R. O. Pennetta, L. 2006. A methodology using GIS, aerial photos and remote sensing for loss estimation and flood vulnerability analysis in the Supersano-Ruffano-Nociglia Graben, southern Italy. *Environmental Geology.* 2006 (50) 4. 581-594.

George, C., Leon, L.F. 2007. WaterBase: SWAT in an open source GIS. *The Open Hydrology Journal*, 1, 19-24.

Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4, 135-143.

Gupta, V.K., Sorooshian, S. 1985. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrological models. *J. Hydrol.* 81, 57-77.

Hayhoe, K., Wake, C.P., Huntington, T.G., Luo, L., Schwartz, M.D, Sheffield, J., Wood, E., Anderson, B., Bradbury, J., Degaetano, A., Troy, T.J., Wolfe, D. Past and future changes in climate and hydrological indicators in the U.S. Northeast. 2006. *Climate Dynamics* DOI 10.1007/s00382-006-0187-8.

Harremoës, P., Madsen, H. 1999. Fiction and reality in the modelling world-balance between simplicity and complexity, calibration and identifiability, verification and falsification. *Water Sci. Technol.* 39 (9), 1-8.

Hundecha, Y. & Bárdossy, A. 2004. Modelling of the effect of land use change on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *J. Hydrol.* 292, 281-295.

Immerzeel, W.W. & Droogers, P. 2008. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *J. Hydrol.* 349 (3-4), 411-424.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2011. Sistema de información componente hidrológico redes, mediciones, observaciones y procesos básicos, Documento integrado, Subdirección de Hidrología.

IGN. 2008. El sistema de referencia CR05 y la proyección transversal de Mercator para Costa Rica CRTM05. Instituto Geográfico Nacional y Unidad Ejecutora: Programa de Regulación y Catastro (UEPRC), San José, Costa Rica.

- Instituto nacional de estadística y censos (INEC). 2011. Censo nacional del año 2011. San José.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2014. El Atlas Digital de Costa Rica 2014, Escuela de Ingeniería Forestal.
- Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv Geosci.* 5, 89-97.
- Kumar, S.M., Narasimhan, S., Bhallamudi, S.M. 2009. Parameter Estimation in Water Distribution Networks. *J. Wat. Res. Mngmnt.* 24 (6), 1251-1272.
- Kobold M, Brilly M. 2006. The use of HBV model for flash flood forecasting. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6: 407-417.
- Lawrence, D., Haddeland, I., Langsholt, E. 2009. Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation. Report Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Norway, pp 33.
- Lhomme, J., Bouvier, C., Perrin, J.L. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *J Hydrol* 299 (2004): 203-216.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, *J. Hydrol.* 201(1997), 272–288.
- Maslia, M.L., Suárez-Soto, R.J., Wang, J., Aral, M.M., Faye, R.E., Sautner, J.B., Valenzuela, C., Grayman, W.M. 2009. Analysis of groundwater flow, contaminant fate and transport, and distribution of drinking water at Tarawa.
- Moradkhani H., Sorooshian S. 2008. General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. *Hydrol Model Water Cycle* 63: 1-24.
- 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. *Trans ASABE.* 50, 885-900.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2010. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Grassland, soil and water research laboratory, Agricultural Research Service, Texas, USA.
- PRUGAM. 2008. Planificación regional y urbana de la Gran Area Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica. Estudio sobre Base Territorial y Zonificación Ambiental para la GAM (PROYECTO I-O-0205-06-IT-PRUGAM) INFORME FINAL.
- Proaño, M. Gavilanes, C., Valenzuela, P., Cisneros, C. 2006. Informe técnico aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. Proyecto Cuencas Andinas - CODESAN - GTZ.

R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Retana, J.A; Villalobos, R. 2006. Eventos extremos Meteorológicos en linda vista valle del Guarco, Cartago. Instituto Meteorologico Nacional, Costa Rica.

Rientjes, T.H.M. 2010. Modelling in Hydrology. Department of Water Resources. Fc. Of Geo-Information Science and Earth Observaction. University of Twente.

Seibert, J., Vis, M.J.P. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrol Earth Syst Sci. 16, 3315-3325.

Seth, I., Soonthornnonda, P., Christensen, E.R. 2006. Use of GIS in urban storm-water modeling. J Environ Eng 32(12):1550–1552.

Skahill, B.E. 2009. More efficient PEST compatible model independent model calibration. J Env Model Softw 24: 517-529.

Sudhira, H.S. 2004. Integration of Agent-based and Cellular Automata Models for Simulating Urban Sprawl. Master Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Geoinformatics.

Tischler, M., Garcia, M., Peters-Lidard, C., Moran, M.S., Miller, S., Thoma, D., Kumar, S., Geiger, J. 2007. A GIS framework for surface-layer soil moisture estimation combining satellite radar measurements and land surface modeling with soil physical property estimation. J. Env. Model. Softw. 22 (6), 891-898.

UNESCO. 1979. Map of the world distribution of arid regions: Explanatory note. Paris.

United Nations Environment Programme (UNEP).1997. World atlas of desertification. London.

Wale A, Rientjes T.H.M., Gieske A.S.M., Getachew H.A. 2009. Ungauged catchment contributions to Lake Tana's water balance. Hydrol Process 23: 3682-3693

## ANEXO 1. Certificado de calibración de las estaciones meteorológicas DAVIS.



### Quality Assurance Statement

This certifies that the enclosed weather station was manufactured and individually tested by:

**Davis Instruments, 3465 Diablo Ave., Hayward, California USA**

All Davis weather stations are assembled in our California factory using rigorous production controls and a quality management system certified by Det Norske Veritas to be compliant to **ISO 9001:2000** standards. Each unit is individually tested for accuracy, consistency and overall product quality. Our goal is to have all units perform to the specifications printed on the reverse side.

To ensure superior product performance, Davis stations undergo numerous tests during the development and manufacturing process:

**Some of our tests are ongoing and are part of a continuous product improvement process:**

**Corrosion testing:** Testing in an accelerated corrosion chamber to verify the durability of mechanical and electronic components.

**Reliability testing:** Testing of stations at remote, harsh weather sites throughout the world.

**Wind tunnel testing:** Extensive wind tunnel testing to verify starting threshold, accuracy over range, and survivability over range.

**UV testing:** Testing in an accelerated UV chamber to verify that components will have a long outdoor life. Verifying that solar panels still function after prolonged UV exposure.

**Mechanical testing:** Testing to ensure the station functions after vigorous vibration.

**Moisture testing:** Verifying that the unit will continue to function well in wet and damp environments. Verifying that the system does not break in freezing wet or dry conditions.

**Life tests:** Verifying that system still functions after thousands of button pushes and millions of bearing revolutions.

**Quality Assurance Program:** Inspection of incoming parts and components to verify they meet Davis' quality specifications.

**Sensor testing:** Long-term evaluation of sensors to determine environmental effects on accuracy.

**In addition to our ongoing testing, each Davis station undergoes these tests:**

**Electronics testing:** Verifying that the station manages power efficiently and conserves battery life.

**Radio testing:** Testing of wireless components before assembly to verify proper function and FCC and EMC conformance and range verification.

**Burn in:** Testing of consoles to check for any defects or malfunctions.

**Final test:** Thorough check of all system functions and sensors performed on every station.

**National Institute of Standards & Technology (NIST) calibration:**

NIST calibration compares sensor performance to a verified national standard of measurement and is available for an additional fee.

WEATHER STATION SENSOR ACCURACY, RESOLUTION AND RANGE

Function	Vantage Pro2	Vantage Vue	Perception II	Weather Wizard III	U.S.A. Units			Metric Units		
					RESOLUTION	RANGE	ACCURACY ±	RESOLUTION	RANGE	ACCURACY ±
					Except for rainfall, all variables are measured in U.S. units of measure and rounded to the nearest metric unit shown in the "Resolution" column.					
AGRICULTURAL	Evapotranspiration	●			0.01"	0 to 199.99"	5%	0.1 mm	0 to 1999.9 mm	5%
	Growing Degree-Days	○			0.1 Degree-Day	Unlimited		0.1 Degree-Day	Unlimited	
	Cooling/Heating Degree-Days	○	✓		0.1 Degree-Day	Unlimited		0.1 Degree-Day	Unlimited	
	Leaf Wetness	●			1	0 to 15	0.5	1	0 to 15	0.5
	Soil Moisture	●			1 cb	0 to 200 cb		1 cb	0 to 200 cb	
BAROMETRIC PRESSURE	Barometric Pressure (Elevation range: -999' to +15,000'; -600 to +4570 m)	✓	✓		0.01" Hg	16" to 32.5" Hg	0.03" Hg	0.1 mm Hg 0.1 mb	410 to 820 mm Hg 540 to 1100 mb or hPa	0.8 mm Hg 1.0 mb or hPa
	Barometric Pressure (Elevation range: -1990' to +12,500'; -600 to +3810 m)			✓	0.01" Hg	18" to 32.5" Hg	0.05" Hg	0.1 mm Hg 0.1 mb	460 to 820 mm Hg 610 to 1100 mb or hPa	1.3 mm Hg 1.7 mb
	Three-Hour Trend	✓	✓		Slow ≥ 0.02" Hg Rapid ≥ 0.06" Hg	5-Position Arrow		Slow ≥ 0.5 mm (0.7 mb) Rapid ≥ 1.5 mm (2 mb)	5-Position Arrow	
	One-Hour Trend			✓	Change ≥ 0.02" Hg	3-Position Arrow		Change ≥ 0.5 mm (0.7 mb)	3-Position Arrow	
HUMIDITY	Inside Humidity	✓	✓		1%	0% to 100%	3%	1%	0% to 100%	3%
	Outside Humidity	✓	✓		1%	0% to 100%	3%	1%	0% to 100%	3%
	Inside Dew Point	○	○		0.1°F	-60° to +140°F	3°F	0.1°C	-50° to +60°C	1.5°C
	Outside Dew Point	✓	✓		1°F	-105° to +130°F	3°F	1°C	-76° to +54°C	1.5°C
RAINFALL	Rainfall	✓	✓	●	0.01"	0 to 199.99"	4%	0.2 mm	0 to 6553 mm Day: 0 to 999.8 mm Total: 0 to 9999 mm	4%
	Rate of Rainfall	✓	✓		0.01"	0 to 96"/hr 0 to 40"/hr	5% ≤ 5"/hr	0.1 mm	0 to 2438 mm/hr 0 to 1016 mm/hr	5% ≤ 127 mm/hr
SOLAR & UV	Solar Radiation	●			1 W/m2	0 to 1800 W/m2	5%	1 W/m2	0 to 1800 W/m2	5%
	Solar Energy	○			0.1 Ly	1999.9 Ly	5%	0.1 Ly	1999.9 Ly	5%
	UV Dose	●			0.1 MEDs	0 to 199 MEDs	5%	0.1 MEDs	0 to 199 MEDs	5%
	UV Index	●			0.1	0 to 16	5%	0.1	0 to 16	5%
TEMPERATURE	Inside Temperature	✓	✓	✓	0.1°F	+32° to +140°F	1°F	0.1°C	0° to +60°C	0.5°C
	Outside Temperature (ISS)	✓	✓	✓	0.1°F	-40° to +150°F	1°F	0.1°C	-40° to +65°C	0.5°C
	Outside Temp (Temp Stn)	●			1°F	-40° to +150°F	1°F	1°C	-40° to +65°C	0.5°C
	Soil or Water Temperature	●			1°F	-40° to +150°F	1°F	1°C	-40° to +65°C	0.5°C
	Inside Heat Index	○	○		0.1°F	+30°F to +165°F	3°F	0.1°C	-1°C to +74°C	1.5°C
	Outside Heat Index	✓	✓		1°F	-40° to +165°F	3°F	1°C	-40° to +74°C	1.5°C
	Temp-Hum-Sun-Wind Index	●			1°F	-90° to +165°F	4°F	1°C	-68° to +74°C	2°C
TIME/DATE	Time	✓	✓	✓	1 minute	12/24 hours	8 sec/mo 15 sec/mo	1 minute	12/24 hours	8 sec/mo 15 sec/mo
	Date	✓	✓	✓	month/day	Leap Year 365 days	8 sec/mo 15 sec/mo	day/month	Leap Year 365 days	8 sec/mo 15 sec/mo
	Sunrise & Sunset	✓	✓	○	1 minute	12 hours	1 minute	1 minute	24 hours	1 minute
WIND	Wind Direction	✓	✓		1° 1° or 10°	0° to 360°	3° 7°	1° 1° or 10°	0° to 360°	3° 7°
	Compass Rose	✓	✓	✓	22.5°	16 compass points		22.5°	16 compass points	
	Wind Speed	✓	✓	✓	1 mph 1 knot	2 to 150 mph 2 to 130 knots	5%	0.1 m/s 1 km/hr	1 to 67 m/s 3 to 241 km/hr	5%
	Direction of High Speed	✓	✓		22.5°	16 compass points		22.5°	16 compass points	
	Wind Run	○	○	○	0.01 mph 0.01 knot	Unlimited	5%	0.01 m/s 0.01 km/hr	Unlimited	5%

- Included
  - Optional sensor required, shown on console
  - Optional, requires WeatherLink.
- Growing degree-days also requires Ag/Turf Management Module. Solar Energy requires Solar Radiation sensor.

"Resolution" refers to the number of digits or decimal places displayed on the console. For metric units, this is not the actual unit of measure except for rainfall. Our rain collector measures in true 0.01" or 0.2 mm increments. All other weather variables are measured and accumulated in U.S. units of measure, which are then converted to metric units for display purposes.

For complete specifications, visit our website at [www.davisnet.com](http://www.davisnet.com), then click on Support » Weather Support » Specification Sheets.

Weather Wizard III calculates and displays wind chill according to the original National Weather Service Formula. A new formula was adopted in 2001. For wind chill using this formula, view the data using WeatherLink or choose Vantage Pro2 or Vantage Vue instead.

ANEXO 2. Certificado de calibración de los sensores de nivel HOBO.



## CALIBRATION CERTIFICATE

LOGGER SERIAL NUMBER: 9870938

CALIBRATION RESULT: PASSED

Report Number	9870938_01_14_11_40
Certification Date	1/14/2011
Logger Type	HOBO Water Level Logger
Water Level Range	0 to 4 m ( 0 to 13 ft )
Logger Part Number	U20-001-04
Logger Status	New
Full Scale Pressure Range	0 to 145 kPa ( 0 to 21 psi )
Calibrated Range	69 to 145 kPa ( 10 to 21 psi ), 0 to 40° C

Onset Computer Corporation certifies that the pressure accuracy of the data logger listed above has been observed to be within its published pressure specifications. Onset Computer's calibrated reference instruments are traceable to NIST, and certification files are maintained at Onset Computer's corporate headquarters in Bourne, MA.

### Test Equipment and Procedures

Pressure Regulator and Calibrator: TE1-9126 ( Calibrated on 4/16/2010 )

Environmental Chamber: TE1-10026

Onset Calibration Software: D-9420

Onset Calibration Procedure: D-9124

Range of Applied Pressures: 69 to 145 kPa ( 10 to 21 psi )

Range of Applied Temperature: 0-40 °C (Nominal)

### Test Data

Pressure (psia)	
Applied	Observed
13.850	13.851
17.150	17.151
20.450	20.449

### Results

Specified Absolute Pressure Accuracy: PASSED

Typical:  $\pm 0.1\%FS$ ,  $\pm 0.14\text{ kPa}$  (  $\pm 0.02\text{ psi}$  )

Maximum:  $\pm 0.3\%FS$ ,  $\pm 0.43\text{ kPa}$  (  $\pm 0.06\text{ psi}$  )

Test Performed By: DM

This calibration report may not be reproduced, except in full, without the written approval of Onset Computer Corporation.

D-9568-F

Onset Computer Corporation 470 MacArthur Blvd. Bourne, MA 02532 USA

Tel: 508-759-9500 Fax: 508-759-9100 Web: [www.onsetcomp.com](http://www.onsetcomp.com) Email: [sales@onsetcomp.com](mailto:sales@onsetcomp.com)

## ANEXO 3. Certificado de calibración del correntómetro USGS

### **Rickly Hydrological Co.** **AquaCount Current Meter Digitizer – CMD**

---

For use with AA/Pygmy current meter and English/Metric measurements

#### **INSTRUCTIONS**

1. Press the ON/SELECT button to turn the unit on.
2. Press ON/SELECT button to cycle through the type of meter used and measurement types. The choices are:
  - a. 1-1: AA Current Meter/English Measurement
  - b. 1-2: AA Current Meter/Metric Measurement
  - c. 2-1: Pygmy Current Meter/English Measurement
  - d. 2-2: Pygmy Current Meter/Metric Measurement
3. Press the COUNT/STOP button to confirm your selection of meter and measurement type. From here, the selection process will focus on the timer settings.
4. Press the ON/SELECT button to cycle through the amount of time desired for counting. Default counter time is 40 seconds.
5. Press the COUNT/STOP button to begin the counting process.

*NOTE: when the COUNT/STOP button is pressed, the count LCD will go blank and the timer LCD will set itself to ZERO. This signifies that the timer is waiting for the first signal from the water. Timing will start when the signal is received. If you decide to change a setting while waiting for the first count, simply press the ON/SELECT button to be taken to Step #2.*

6. When the timer has reached the timer limit, it will continue timing until the final signal is received.

*NOTE: if timer is set to start at zero in Step #2, you must press the COUNT/STOP button for it to signal to get the last signal, and then stop timing.*

7. Press the COUNT/STOP button to calculate the formula and display VELOCITY.

*NOTE: you may also press the ON/SELECT button to skip the calculation and start another timing.*

#### **RICKLY HYDROLOGICAL Co.**

1700 Joyce Avenue • Columbus, Ohio 43219 USA  
Phone: (614) 297-9877      www.rickly.com  
Fax: (614) 297-9878      E-mail: sales@rickly.com

## ANEXO 4. Hoja técnica de los sensores del satélite WorldView-II.



### WorldView-2

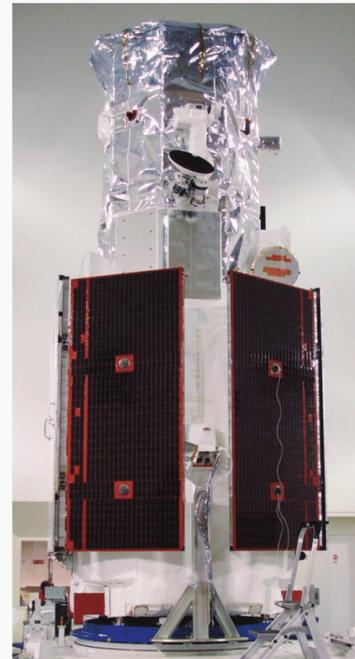
WorldView-2, launched October 2009, is the first high-resolution 8-band multispectral commercial satellite. Operating at an altitude of 770 km, WorldView-2 provides 46 cm panchromatic resolution and 1.85 m multispectral resolution. WorldView-2 has an average revisit time of 1.1 days and is capable of collecting up to 1 million km<sup>2</sup> of 8-band imagery per day, greatly enhancing DigitalGlobe's multispectral collection capacity for more rapid and reliable collection. WorldView-2 substantially expands imagery product offerings to all DigitalGlobe customers.

#### Features

- » Very high resolution
- » The most spectral diversity commercially available
  - 4 standard colors: blue, green, red, near-IR1
  - 4 new colors: coastal, yellow, red edge, and near-IR2
- » Industry-leading geolocation accuracy
- » High capacity over a broad range of collection types
- » Bi-directional scanning
- » Rapid retargeting using Control Moment Gyros (>2x faster than any competitor)
- » Direct downlink to customer sites available
- » Frequent revisits at high resolution

#### Benefits

- » Provides highly detailed imagery for precise map creation, change detection, and in-depth image analysis  
(Note: imagery must be re-sampled to 50 cm for non-US government customers)
- » Geolocate features to less than 5 m to create maps in remote areas, maximizing the utility of available resources.
- » Collects, stores, and downlinks a greater supply of frequently updated global imagery products than competitive systems
- » Stereoscopic collection on a single pass, ensures image continuity and consistency of quality
- » Provides the ability to perform precise change detection, mapping and analysis at unprecedented resolutions in 8-band multispectral imagery



New WorldView-2 clean room pre-launch preparations. The third of DigitalGlobe's state-of-the-art high-resolution commercial imagery satellites.

**Design specifications**

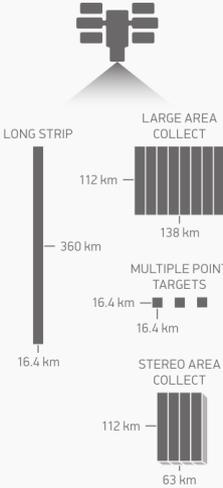
<b>Launch Information</b>	Date: October 8, 2009 Launch Vehicle: Delta 7920 (9 strap-ons) Launch Site: Vandenberg Air Force Base, California
<b>Orbit</b>	Altitude: 770 km Type: Sun synchronous, 10:30 am descending node Period: 100 min.
<b>Mission Life</b>	10-12 years, including all consumables and degradables (e.g. propellant)
<b>Spacecraft Size, Mass and Power</b>	5.7 m (18.7 ft) tall x 2.5 m (8 ft) across 7.1 m (23 ft) across the deployed solar arrays 2615 kg (5765 lbs) 3.2 kW solar array, 100 Ahr battery
<b>Sensor Bands</b>	Panchromatic: 450 - 800 nm 8 Multispectral: Coastal: 400 - 450 nm    Red: 630 - 690 nm Blue: 450 - 510 nm    Red Edge: 705 - 745 nm Green: 510 - 580 nm    Near-IR1: 770 - 895 nm Yellow: 585 - 625 nm    Near-IR2: 860 - 1040 nm
<b>Sensor Resolution</b>	Panchromatic: 0.46 m GSD at nadir, 0.52 m GSD at 20° off-nadir Multispectral: 1.85 m GSD at nadir, 2.07 m GSD at 20° off-nadir
<b>Dynamic Range</b>	11-bits per pixel
<b>Swath Width</b>	16.4 km at nadir
<b>Attitude Determination and Control</b>	3-axis stabilized Actuators: Control Moment Gyros (CMGs) Sensors: Star trackers, solid state IRU, GPS
<b>Pointing Accuracy and Knowledge</b>	Accuracy: <500 m at image start and stop Knowledge: Supports geolocation accuracy below
<b>Retargeting Agility</b>	Time to Slew 200 km: 10 sec
<b>Onboard Storage</b>	2199 Gb solid state with EDAC
<b>Communications</b>	Image and Ancillary Data: 800 Mbps X-band Housekeeping: 4, 16 or 32 kbps real-time, 524 kbps stored, X-band Command: 2 or 64 kbps S-band
<b>Max Contiguous Area Collected in a Single Pass (30° off-nadir angle)</b>	Mono: 138 x 112 km (8 strips) Stereo: 63 x 112 km (4 pairs)
<b>Revisit Frequency (at 40°N Latitude)</b>	1.1 days at 1 m GSD or less 3.7 days at 20° off-nadir or less (0.52 m GSD)
<b>Geolocation Accuracy (CE90)</b>	Demonstrated <3.5 m CE90 without ground control
<b>Capacity</b>	1 million km <sup>2</sup> per day

All imagery complies with U.S. regulation.

**Altitude and slew time**



**Collection scenarios (30° off-nadir angle)**



**Sensor bands**

-  Panchromatic
-  Multispectral
-  4 additional bands

DS-WV2 06/13

## ANEXO 5. Hoja técnica de los sensores del satélite WorldView-I.



### WorldView-1

DATA SHEET 

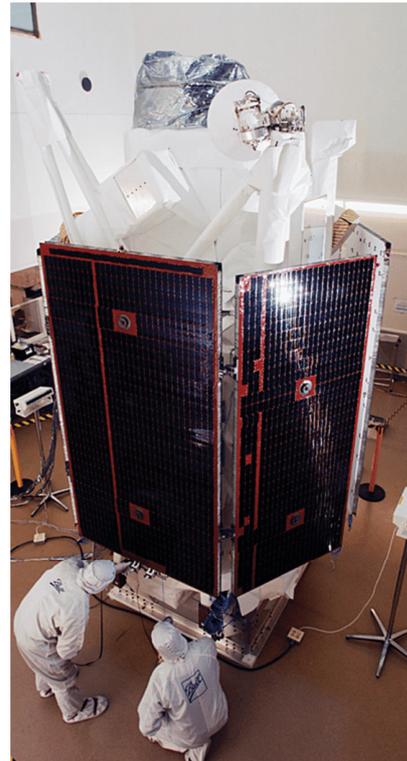
WorldView-1, launched September 2007, is the first of our next-generation satellites—the most agile satellites ever flown commercially. The high-capacity, panchromatic imaging system features half-meter resolution imagery. Operating at an altitude of 496 km, WorldView-1 has an average revisit time of 1.7 days and is capable of collecting over one million km<sup>2</sup> per day of half-meter imagery. The satellite is also equipped with state-of-the-art geolocation accuracy capabilities and exhibits stunning agility with rapid targeting and efficient in-track stereo collection.

#### Features

- Very high resolution
- Industry-leading geolocation accuracy
  - Ultra-stable platform, high-precision attitude sensors and GPS
- Highest capacity over a broad range of collection types (wider than any competitor)
- Bi-directional scanning
- Rapid retargeting using Control Moment Gyros (>2x faster than any competitor)
- Direct downlink to customer sites available
- World-class telescope
  - High contrast (MTF) and signal to noise ratio
  - Selectable Time Delay Integration (TDI) levels
- Frequent revisits at high resolution

#### Benefits

- Provides highly detailed imagery for precise map creation, change detection, and in-depth image analysis  
(Note: Imagery must be re-sampled to 50 cm for non-US Government customers)
- Geolocate features to less than 5 m to create maps in remote areas, maximizing the utility of available resources.
- Collects, stores, and downlinks a greater supply of frequently updated global imagery products than competitive systems
- Stereoscopic collection on a single pass, ensures image continuity and consistency of quality
- Extends the range of suitable imaging collection targets and enhances image interpretability
- Enhanced change detection applications and accurate map updates



WorldView-1 clean room pre-launch preparations. The second of DigitalGlobe's state-of-the-art high-resolution commercial imagery satellites.



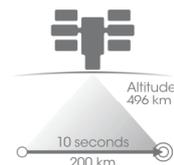
# WorldView-1

DATA SHEET

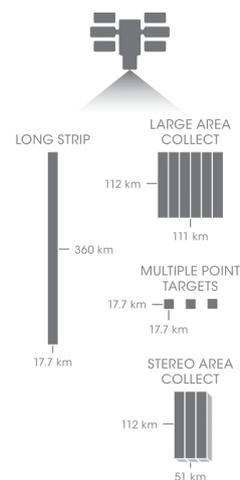
## Design and Specifications

<b>Launch Information</b>	Date: September 18, 2007 Launch Vehicle: Delta 7920 (9 strap-ons) Launch Site: Vandenberg Air Force Base, California
<b>Orbit</b>	Altitude: 496 km Type: Sun synchronous, 10:30 am descending node Period: 95 min.
<b>Mission Life</b>	10-12 years, including all consumables and degradables (e.g. propellant)
<b>Spacecraft Size, Mass and Power</b>	3.6 m (12 ft) tall x 2.5 m (8 ft) across 7.1 m (23 ft) across the deployed solar arrays 2290 kg (5038 lbs) 3.2 kW solar array, 100 Ahr battery
<b>Sensor Bands</b>	Panchromatic: 400 - 900 nm
<b>Sensor Resolution</b>	50 cm Ground Sample Distance (GSD) at nadir 55 cm GSD at 20° off-nadir
<b>Dynamic Range</b>	11-bits per pixel
<b>Swath Width</b>	17.7 km at nadir
<b>Attitude Determination and Control</b>	3-axis stabilized Actuators: Control Moment Gyros (CMGs) Sensors: Star trackers, solid state IRU, GPS
<b>Pointing Accuracy and Knowledge</b>	Accuracy: < 500 m at image start and stop Knowledge: Supports geolocation accuracy below
<b>Retargeting Agility</b>	Time to Slew 200 km: 10 sec
<b>Onboard Storage</b>	2199 Gb solid state with EDAC
<b>Communications</b>	Image and Ancillary Data: 800 Mbps X-band Housekeeping: 4, 16 or 32 kbps real-time, 524 kbps stored, X-band Command: 2 or 64 kbps S-band
<b>Max Contiguous Area Collected in a Single Pass (30° off-nadir angle)</b>	Mono: 111 x 112 km (6 strips) Stereo: 51 x 112 km (3 pairs)
<b>Revisit Frequency (at 40°N Latitude)</b>	1.7 days at 1 m GSD or less 5.4 days at 20° off-nadir or less (0.55 m GSD)
<b>Geolocation Accuracy (CE90)</b>	Demonstrated <4.0 m CE90 without ground control
<b>Capacity</b>	1.3 million km <sup>2</sup> per day

## Altitude and Slew Time



## Collection Scenarios (30° off-nadir angle)



## Sensor Bands

Panchromatic

All imagery complies with U.S. regulation.

DS-WV1 Rev 01/13

**ANEXO 6.** Red de puntos de control de tierra (GCPs) para la cuenca del río Agua Caliente.

Punto	ID	Este (m)	Norte (m)	Elevación ortométrica (m)	Fuente
1	84	508468.227	1089728.375	1408.314	PRUGAM
2	83	506474.039	1091174.132	1422.685	PRUGAM
3	81	500408.336	1094427.504	1282.972	PRUGAM
4	75	515662.109	1087226.358	1287.209	PRUGAM
5	74	505659.410	1094723.547	1546.611	PRUGAM
6	60	507287.589	1097276.739	1947.864	PRUGAM
7	61	513629.784	1092319.247	1625.719	PRUGAM
8	45	515912.320	1095086.045	1961.431	PRUGAM
9	44	509082.544	1099571.126	2302.552	PRUGAM
10	43	505689.041	1101444.937	2051.836	PRUGAM
11	30	511865.323	1101252.101	2750.681	PRUGAM
12	31	516010.364	1098642.627	2597.022	PRUGAM
13	29	511129.526	1102329.952	2929.902	PRUGAM
14	23	515319.164	1102602.054	3405.798	PRUGAM
15	85	513338.232	1084848.913	1094.927	PRUGAM
16	82	503554.838	1090269.047	1386.729	PRUGAM
17	100	504030.204	1088024.001	1385.450	PRUGAM
18	101	505861.617	1086737.148	1383.669	PRUGAM
19	110	502140.315	1085174.702	1943.028	PRUGAM
20	161	504699.926	1083235.024	1842.781	PRUGAM
21	126	498700.221	1084064.117	1957.697	PRUGAM
22	125	495353.716	1088254.335	1496.965	PRUGAM
23	205	497076.230	1085542.267	1887.769	PRUGAM
24	3	510120.563	1089621.475	1399.049	ITCR
25	4	509937.563	1091249.816	1449.497	ITCR
26	5	509509.198	1090821.523	1432.562	ITCR
27	7	508978.591	1092470.646	1538.441	ITCR
28	8	508759.606	1090706.695	1437.481	ITCR
29	9	509965.555	1086728.290	1315.462	ITCR
30	10	506843.771	1093300.928	1519.391	ITCR
31	11	506809.174	1088484.997	1380.132	ITCR
32	12	501174.191	1088333.698	1413.366	ITCR
33	13	513185.474	1093449.078	1792.631	ITCR
34	14	512484.289	1095988.101	2095.109	ITCR
35	15	515278.460	1100265.196	2875.491	ITCR
36	16	512861.754	1098278.651	2339.675	ITCR
37	17	516035.115	1103158.253	3431.927	ITCR
38	18	516892.845	1103215.134	3349.668	ITCR
39	19	517019.404	1103342.340	3327.381	ITCR
40	20	513657.226	1088028.895	1347.415	ITCR
41	21	514725.100	1087853.764	1326.646	ITCR
42	22	514517.700	1084449.838	1055.068	ITCR

# DATASHEET

## TRIMBLE R3 GPS SYSTEM



### KEY FEATURES

A unique integrated survey-grade L1 GPS receiver and rugged PDA solution

Field-proven and robust for tough surveying conditions

Trimble GPS technology for quality and confidence

Microsoft® Windows Mobile™ for Pocket PC operating system, the industry standard



The Trimble® R3 GPS system is a complete L1 GPS postprocessed solution from the industry leader in GPS surveying technology. Combining an L1 GPS receiver and antenna, rugged handheld controller, and easy-to-use field and office software, the Trimble R3 system brings precise sub-centimeter control to your site, establishes new localized control, and collects topographic data. The system operates without line-of-sight between points, and it can operate day or night in any weather.

#### A UNIQUE FORM FACTOR THAT WORKS AS HARD AS YOU DO

For the first time, the Trimble R3 system integrates a survey-grade receiver with the popular Trimble® Recon® controller, a proven, ultra-rugged PDA designed especially for tough surveying conditions. The compact and lightweight Trimble R3 system thus handles drops, extreme temperatures, and water with ease, making it one of the toughest L1 GPS solutions available. It also spares you the expense of a separate GPS receiver.

The Trimble Recon offers many other innovative features to make your L1 GPS workflow easy and efficient: a large color touchscreen, expandable memory, and USB support to name a few.

#### A TOTAL SURVEYING SOLUTION FOR L1 GPS

The Trimble R3 GPS system contains the same proven Trimble Maxwell™ technology used in Trimble's advanced, dual-frequency GPS systems, so you can have complete confidence in the accuracy and quality of your results. Simply set up two or more systems to quickly establish a survey network and then log your data. Download the data to your PC for easy baseline processing.

The Trimble R3 system employs a similar workflow to the advanced Trimble Survey Controller™ software, the most popular GPS field solution in the surveying industry. Additionally, every component of the Trimble R3 system is designed and developed by Trimble to work together as a total surveying solution. The Trimble R3 thus offers the performance and reliability of an advanced system, while remaining an extremely cost-effective investment.

#### FAMILIAR, EASY-TO-USE SOFTWARE IN THE FIELD AND OFFICE

The Trimble R3 system runs the Microsoft Windows Mobile for Pocket PC operating system, which is the worldwide industry standard for PDAs. This means you can run additional specialized Pocket PC programs, including Pocket Word or Excel, making the Trimble R3 system very flexible and suitable for multiple uses.

Windows Mobile for Pocket PC also makes the Trimble R3 system very easy to use. New users have a very short learning curve on the operating system and Trimble® Digital Fieldbook™ field software because of the familiar options, menus, and terminology.

Trimble® Business Center office software is also designed to be intuitive and easy to learn. Even first-time users will experience effortless download, increased productivity, and superior quality control with minimal effort.

## A TOTAL SURVEYING SOLUTION FOR L1 GPS



### INTEGRATED SURVEYING™ GPS RECEIVER AND ADVANCED PDA

A unique, integrated solution, the Trimble R3 is compact, lightweight and convenient. It's also economical: no additional receiver purchase is required.

### GPS RECEIVER TECHNOLOGY FROM TRIMBLE

Proven Trimble Maxwell technology for L1 GPS delivers superior satellite tracking, faster measuring, optimal precision, and lower power usage. Solve all your high-precision control needs with accurate baseline measurements.

### POWERFUL AND ULTRA-RUGGED

The Trimble Recon controller contains a powerful 400 MHz Intel XScale processor and is specifically designed for tough surveying environments; it's extremely robust, exceeding military specifications for drop, vibration, immersion, and operating temperatures.

### FLEXIBLE, MULTI-USE PDA

On the Windows Mobile for Pocket PC operating system, run your choice of specialized Pocket PC programs, including Pocket Word and Excel.

### EASY-TO-USE FIELD SOFTWARE

The Trimble Digital Fieldbook software reflects industry standards for its UI. New users can quickly learn to operate the system via familiar options, menus, and commands.

### LARGE COLOUR TOUCH SCREEN

The large color display on the Trimble Recon makes viewing data and maps easy even in poor light conditions. Navigating through software via the touch screen is fast and efficient.

### FAST DATA TRANSFER

Transfer data to a PC at speeds of more than 1 Mb/s—ten times faster than the fastest serial port.

### EXPANDABLE MEMORY

Extend the system's data storage space via the CompactFlash Card slot on the Trimble Recon controller.

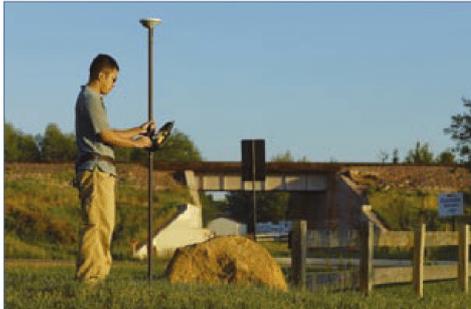
### ROBUST, LOW-MULTIPATH GPS ANTENNA

The Trimble® A3 L1 GPS antenna resists unwanted signal interference or "multipath", which can cause inaccurate measurements. Multipath is caused by signals being reflected from surfaces such as the ground, surrounding trees, or buildings.

### A TOTAL SURVEYING SOLUTION

Every part of the Trimble R3 system, from the hardware to the software, is designed to work together. Collect data in the field then seamlessly transfer your job file to the Trimble Business Center software in the office for processing.





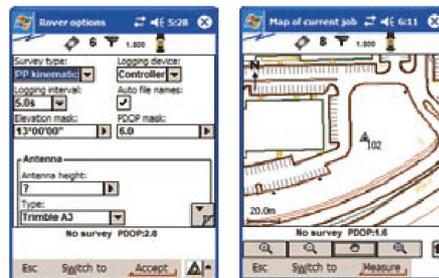
### TRIMBLE DIGITAL FIELDBOOK SOFTWARE

Trimble Digital Fieldbook field software controls the Trimble R3 GPS system in the field. It makes performing Static, FastStatic, Kinematic, and continuous Kinematic surveys on short to moderate baselines fast, easy, and productive.

The software is simply designed and is extremely user-friendly, so even new users can learn the software and reach maximum productivity in a short time. You can introduce your survey crews to GPS surveying without significant downtime while they master the new techniques; your Trimble R3 GPS system will begin its return on your investment almost immediately.

Trimble Digital Fieldbook software runs from an active, real-time map display. Use the colour touch screen on the Trimble Recon controller to navigate through the software and access your data—this speeds up all your work! The software organizes each job into a single Job file for easy data transfer in the field or office.

Audible messages provide status updates and alert you to changing conditions so that you don't miss a thing. Innovative features, map-centric displays, and numerous customizable tools all help you to do every part of every job faster and more easily.

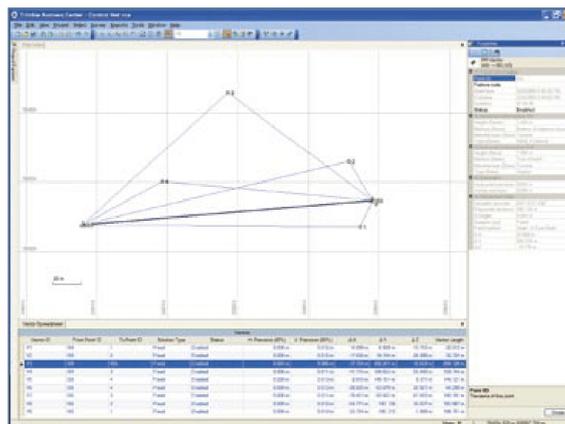


### OFFICE PROCESSING EFFICIENCY: TRIMBLE BUSINESS CENTER

In the office, transfer your field data to the Trimble Business Center software on your PC to quickly process baselines and generate sub-centimeter results. Trimble Business Center also performs data reduction, computation, QA/QC and network adjustment. It even provides tools to both identify and correct field errors. Control data and background maps can be exported to Trimble Digital Fieldbook for use in the field.

Trimble Business Center is a sophisticated, but exceptionally easy-to-use, solution for postprocessing L1 GPS survey data. It features the following:

- Intuitive display, navigation and selection of data
- Integrated data transfer to and from the Trimble Recon
- Import/Export of ASCII data (including custom formats)
- Graphical and command-driven tools to aid in assuring the quality of your project
- A library of global coordinate systems
- Baseline loop closure
- Network adjustment



# TRIMBLE R3 GPS SYSTEM

## PERFORMANCE SPECIFICATIONS

### Measurements

- 12 Channels L1 C/A Code, L1 Full Cycle Carrier, WAAS/EGNOS
- Trimble Maxwell GPS technology for robust satellite tracking
- Trimble EVEREST™ multipath reduction technology

### Static and FastStatic GPS surveying<sup>1</sup>

Horizontal ..... ±(5 mm + 0.5 ppm)<sup>2</sup> RMS  
 Vertical ..... ±(5 mm + 1 ppm)<sup>2</sup> RMS

### Kinematic surveying<sup>1</sup>

Horizontal ..... ±(10 mm + 1 ppm)<sup>2</sup> RMS  
 Vertical ..... ±(20 mm + 1 ppm)<sup>2</sup> RMS

### Real-Time positioning with WAAS/EGNOS<sup>3</sup>

WAAS/EGNOS differential positioning  
 ..... accuracy typically <3 m 3DRMS

## HARDWARE

### Trimble R3 GPS system

#### Physical

Dimensions (WxHxL) ..... 9.5 cm x 4.4 cm x 24.2 cm  
 (3.7 in x 1.7 in x 9.5 in)

Weight ..... with internal battery: 0.62 kg (1.37 lb)

Casing ..... lightweight, fully sealed, toughened industrial plastic

Sand and Dust ..... IP6X

Waterproof ..... IPX7

Shock and vibration ..... tested and meets the following environmental standards:

Shock ..... MIL-STD-810F to survive a 1 m (3.28 ft) drop onto concrete

Vibration ..... MIL-STD-810-F on each axis

#### Electrical

Power ..... DC input 5.0 V DC

Power consumption ..... 0.6 W receiver and antenna

Battery ..... up to 8 hours on a full charge

Recon Battery weight ..... 0.20 kg (0.44 lb)

Recon Battery charger ..... internal with external AC power adapter

Certification ..... Class B Part 15 FCC certification, CE Mark approved, C-Tick approved, Canadian FCC

#### Environmental

Operating temperature<sup>4</sup> ..... -30°C to +60°C (-22°F to +140°F)

Storage temperature ..... -40°C to +70°C (-40°F to +158°F)

Humidity ..... 100%, condensing

## Communications

- 1 x external power port
- 1 x RS232 serial port
- Integrated USB for data download speeds in excess of 1 Mb/s
- External SMB type GPS antenna connector
- 2 x CompactFlash ports when Trimble R3 not installed

## Data Logging

- More than 900 hours of continuous L1 logging at 15 seconds with 6 satellites is typical with 64 MB Recon memory
- Maximum of 1 Hz positioning and data logging

## TRIMBLE A3 ANTENNA

Dimensions ..... 16.2 cm (6.38") diameter, 6.2 cm (2.44") height

Frequency ..... 1575.42 ±10 MHz

Antenna Gain ..... 42 dB min (amp plus antenna)

Polarization ..... right hand circular

Voltage ..... 2.95 V DC to 11.5 V DC  
 (max 18 V DC – not for continuous operation)

Current ..... 60 mA max

Connector ..... TNC bulkhead

Weight ..... 0.39 kg (0.86 lb)

#### Temperature:

Operating ..... -50 °C to +85 °C (-58 °F to +185 °F)

Storage ..... -50 °C to +85 °C (-58 °F to +185 °F)

Mounting ..... 5/8–11 thread

## STANDARD SYSTEM ACCESSORIES

- Trimble HI tape
- Trimble R3 system field case
- Trimble R3 pouch
- Trimble Recon cap base
- Trimble A3 antenna cable
- Tripod bracket

## OPTIONAL SYSTEM ACCESSORIES

- Range pole bracket
- Trimble Recon vehicle charger

<sup>1</sup> Accuracy may be subject to conditions such as multipath, obstructions, satellite geometry, and atmospheric parameters. Always follow recommended survey practices.

<sup>2</sup> PPM is relative to baseline length.

<sup>3</sup> Depends on WAAS/EGNOS system performance.

<sup>4</sup> Receiver operates normally to -30 °C (-22 °F) but some office-based functions such as USB download is not recommended at temperatures below freezing.

Specifications subject to change without notice.



© 2005, Trimble Navigation Limited. All rights reserved. Trimble, and the Globe & Triangle logo are trademarks of Trimble Navigation Limited, registered in the United States Patent and Trademark Office and in other countries. Digital Fieldbook, EVEREST, Integrated Surveying, Maxwell, and Trimble Survey Controller are trademarks of Trimble Navigation Limited. Recon is a registered trademark of Tripod Data Systems Inc., a wholly owned subsidiary of Trimble Navigation Limited. All other trademarks are the property of their respective owners. PN 02543-146 (09/05)



## NORTH AMERICA

Trimble Engineering & Construction Group  
 5475 Kellenburger Road  
 Dayton, Ohio 45424-1099 • USA  
 800-538-7800 (Toll Free)  
 +1-937-245-5154 Phone  
 +1-937-233-9441 Fax

## EUROPE

Trimble GmbH  
 Am Prime Parc 11  
 65479 Raunheim • GERMANY  
 +49-6142-2100-0 Phone  
 +49-6142-2100-550 Fax

## ASIA-PACIFIC

Trimble Navigation Singapore Pty Limited  
 80 Marine Parade Road  
 #22-06, Parkway Parade  
 Singapore 449269 • SINGAPORE  
 +65-6348-2212 Phone  
 +65-6348-2232 Fax



www.trimble.com

ANEXO 8. Estudio de calidad de Agua del Río Agua Caliente



FUNDACIÓN TECNOLÓGICA DE COSTA RICA (FUNDATEC)  
(Fundación del Instituto Tecnológico de Costa Rica)

CENTRO DE INVESTIGACION Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)  
☎ (506) 2591-5149 ó 2550-2368, Fax: (506) 2591-5147, Apartado 159-7050 Cartago.  
Email: ceqiatec@itcr.ac.cr

RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO

TIPO DE MUESTRA:	AGUA RESIDUAL	FECHA DE RECIBO:	12-04-11
ESTADO DE LA MUESTRA:	LIQUIDA	FECHA INICIO ANÁLISIS	12-04-11
PROCEDENCIA:	PROY MODELACION HIDROLOGICA RIO NAVARRO	FECHA DE INFORME:	06-05-11/16-06-11
		Nº DE INFORME:	360411
OBJETIVO DEL ANÁLISIS: <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN			
ANALISIS		RESULTADOS	
		01	
Sólidos suspendidos (mg/L) *		( 188 ± 3)	
Nitrógeno total (mg/L) **		(0,83 ± 0,01)	
Fósforo total (mg/L) **		(1,45 ± 0,48)	

Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QUI) métodos código PT-QUI-01-03; basados en la 21<sup>th</sup> edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 2005.

(\*) Ensayo acreditado ante el Ente Costarricense de Acreditación según la Norma INTE/ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de la acreditación en la página [www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr).

TIPO DE MUESTREO: realizado por el Cliente.

OBSERVACIONES:

**Muestra 01:** Agua de Río Navarro

(±) La incertidumbre que se reporta, es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.  
Permiso Sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2378-09. Vence el 06-10-2011

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el momento y el día arriba indicado.

SOLICITADO POR: ING. MAIKEL MENDEZ MORALES

APROBADO POR: B.Q. LUIS GERARDO CHAVES BARQUERO  
REGENTE QUIMICO



*Ricardo Coy Herrera*  
B.Q. RICARDO COY HERRERA  
REGENTE QUIMICO