

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE USO DE SUELO SOBRE LA
DISPONIBILIDAD DE AGUA: EL CASO DE LA CUENCA ALTA DEL
RÍO GUAYLLABAMBA**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO DE USO DEL
SUELO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA
ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA, MEDIANTE LA MODELACIÓN
HIDROLÓGICA COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

FÁTIMA LUCÍA NACIMBA AMAGUA

fatimanacimba2511@gmail.com

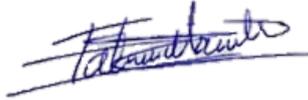
DIRECTOR: MARCOS JOSHUA VILLACIS ERAZO

marcos.villacis@epn.edu.ec

DMQ, agosto de 2022

CERTIFICACIONES

Yo, FÁTIMA LUCÍA NACIMBA AMAGUA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



FÁTIMA LUCÍA NACIMBA AMAGUA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por FÁTIMA LUCÍA NACIMBA AMAGUA, bajo mi supervisión.

MARCOS JOSHUA VILLACIS ERAZO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

FÁTIMA LUCÍA NACIMBA AMAGUA

MARCOS JOSHUA VILLACIS ERAZO

DEDICATORIA

A mi mamá, quien es el principal pilar en mi vida, con su apoyo incondicional, consejos, recomendaciones ha estado en cada una de mis caídas para ayudarme a levantar y seguir. Por su esfuerzo diario para que pueda llegar hasta donde estoy ahora, quien me enseñó que todo en la vida es posible.

Mis abuelitos quienes son lo mejor que tengo, que han estado conmigo en todo momento y aunque no entiendan muchas cosas han estado ahí para apoyarme en todo.

Mis sobrinos quienes espero aprendan de mis experiencias para seguir adelante sin importar los problemas que se presenten.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y la vida por permitirme cometer errores y aprender de ellos.

Mi mamá Martha el pilar fundamental en mi vida le agradezco infinitamente por cada uno de sus esfuerzos, porque conozco el cansancio que tuvo que pasar para vernos a sus hijos con una profesión, le agradezco por enseñarme el valor de la honestidad, por su amor y apoyo incondicional, por no dejarme en mis momentos de confusión, quien a pesar de mis malas decisiones supo apoyarme y brindarme esa seguridad de que todo es posible. Gracias por ser esa mamá que siempre dijo “No importa el esfuerzo con tal que ustedes estén bien, tengan su profesión y se puedan defender en la vida” y como siempre dice “La educación es la única herencia que les va ayudar a progresar y nadie les va a quitar” sabias palabras que siempre las llevo conmigo, a usted se lo debo todo.

Mis abuelitos Ofelia e Ignacio, quienes han sido como unos padres para mí y se han convertido en un pilar en mi vida, gracias por todo su apoyo a ustedes les debo mucho.

Mis hermanos Fernando y Oscar, quienes a pesar de nuestras diferencias hemos estado juntos en los peores momentos para apoyarnos y ayudarnos mutuamente. Fernando mi hermano mayor quien ha sabido aconsejarme y ayudarme en mis decisiones académicas, quien ha sabido ser un protector en los momentos difíciles. Oscar mi hermano menor quien a pesar que no lo diga es mi más ferviente defensor, quien más me protege. Francisco mi tío, pero a quien quiero como hermano gracias por toda tu ayuda, porque sin pedírtelo has estado ahí.

Mis cuñadas que me han ayudado en este proceso universitario, en especial a Mary que con sus consejos, aliento y ayuda permitió que pueda realizar mis tareas universitarias, pasantías con mayor tranquilidad.

Maribel Jayo gracias por su gran ayuda en aquel momento difícil de mi vida, usted fue clave importante para ese impulso que me faltaba.

Mis amigos quienes han sido una alegría en mi vida, esa familia que uno puede escoger en especial a los integrantes del grupo “Solo panas y la Daya”, ustedes me han ayudado mucho, tanto en lo académico como en lo personal, gracias por todos los consejos y momentos vividos.

Daya mi mejor amiga quien ha estado en mis peores momentos quien siempre me aconseja y me ayuda a encontrar solución a mis problemas de forma inmediata.

Adry mi mejor amiga quien con sus experiencias me ayuda a ver la vida de otra forma, además de siempre aconsejarme y estar conmigo en las buenas y malas.

Mis colegas de proyecto Dennis y Sarita gracias por toda su ayuda, paciencia y disposición para la realización de este proyecto, a pesar del desconocimiento inicial supimos darnos la mano y sacarlo adelante.

Agradezco a mi tutor Marcos Villacís, quien supo atender mis inquietudes de forma oportuna y dar solución a las mismas.

Agradezco a la ingeniería Sandra Mena por disipar cada una de las dudas, que a pesar de la distancia y diferencia de horarios tuvo tiempo para compartir sus conocimientos en el desarrollo del modelo hidrológico HEC-HMS.

Un especial agradecimiento al ingeniero Miguel Ortega quien facilito las bases de datos hidrológicas, meteorológicas, calibración y uso del suelo del año 1982, además de su paciencia para compartir todos sus conocimientos en la ejecución del modelamiento hidrológico en HEC-HMS.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Uso y cobertura del suelo	3
1.4.2 Textura del suelo	4
1.4.3 Descripción de componentes hídricos.....	4
1.4.4 Modelo hidrológico	6
1.4.5 Proceso de calibración.....	9
1.4.6 Proceso de optimización	9
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Zona de estudio	10
2.2 METODOLOGÍA	12
2.2.1 Generación de información	12
2.2.2 Generación de mapas de uso de suelo	13
2.2.3 Grupos hidrológicos, Cobertura y uso de suelo	15
2.2.4 Análisis de datos meteorológicos	17
2.2.5 Modelo Hidrológico.....	21
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
3.1 RESULTADOS.....	30
3.1.1 Cambio de uso del suelo.....	30
3.1.2 Resultados de calibración	40
3.1.3 Resultados de simulación hidrológica HEC-HMS	46
3.2 Conclusiones	52

3.3	Recomendaciones	53
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
5	ANEXOs	61

RESUMEN

Las cuencas hidrográficas contribuyen al flujo de agua hacia los ríos a través de las áreas de terreno mismos que cada vez tienen mayor afectación por el incremento poblacional y progreso económico que ha ocasionado cambios en la cobertura del suelo, provocando alteraciones sobre los ecosistemas y especialmente en el agua. Por lo cual el proyecto tiene como finalidad evaluar la disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba localizada en la sierra ecuatoriana, con una superficie de 6427,35 km², como consecuencia de los cambios en el uso del suelo. La evaluación de la disponibilidad de agua se la realizó en la estación hidrológica H-0146 (DJ-Alambi) a partir de mapas de coberturas del uso de suelo en los años 1982 y 2014. Para el uso de datos meteorológicos e hidrometeorológicos se utilizó valores diarios de precipitación, evapotranspiración y caudal. Teniendo como base esta información y mediante los datos de uso del suelo se hizo empleo del modelo hidrológico HEC-HMS, donde se llevó a cabo la calibración de los modelos, de modo que se pueda realizar una posterior simulación y de esta manera estimar la disponibilidad de agua. A través de los resultados obtenidos de la simulación en el modelo hidrológico se presenta una relación proporcional precipitación – caudal, además se establece que para el año 2014 existió un aumento del 36.86% de caudal debido a las condiciones de cambio de uso del suelo. Los resultados de esta investigación pueden ser apropiados para actualizar los estudios en cuanto a disponibilidad de agua, para una mejor toma de decisiones orientada a una gestión adecuada de los recursos hídricos en la cuenca.

PALABRAS CLAVE: Cuenca hidrográfica, cambio uso del suelo, HEC-HMS, disponibilidad de agua, Río Guayllabamba.

ABSTRACT

Watersheds contribute to the flow of water to the rivers through the land areas that have been affected by population growth and economic progress that has caused changes in land cover, causing alterations in ecosystems and especially in water. Therefore, the project aims to evaluate water availability in the Upper Guayllabamba River Basin located in the Ecuadorian highlands, with an area of 6427.35 km², as a result of changes in land use. The evaluation of water availability was carried out at hydrological station H-0146 (DJ-Alambi) based on land use cover maps for the years 1982 and 2014. For the use of meteorological and hydrometeorological data, daily values of precipitation, evapotranspiration and flow were used. Based on this information and using land use data, the HEC-HMS hydrological model was used, where the calibration of the models was carried out, so that a subsequent simulation could be carried out and thus estimate water availability. Through the results obtained from the simulation in the hydrological model, a proportional precipitation - flow relationship is presented, and it is also established that for the year 2014 there was an increase of 36.86% of flow due to the conditions of land use change. The results of this research may be appropriate to update the studies on water availability, for better decision making aimed at proper management of water resources in the basin.

KEYWORDS: Watersheds, land use change, HEC-HMS, water availability, Guayllabamba river.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El valor de los recursos hídricos en los últimos años es más relevante debido a su disponibilidad limitada de aproximadamente 35 billones hm^3 a nivel mundial, su uso y gestión apropiados puede disminuir su pérdida (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2018). Las unidades territoriales más reconocidas para la gestión integrada de los recursos hídricos son las cuencas hidrográficas que son surtidores importantes de agua dulce (Dourojeanni et al., 2002). Los suministros de agua en las cuencas se encuentran amenazados debido al aumento de actividades antropogénicas que provocan cambios en el uso y cobertura del suelo ocasionando erosión, deforestación y degradación (Buytaert & De Bievre, 2012).

En el Ecuador los cambios de uso de suelo se han establecido principalmente en las cuencas hidrográficas y áreas de montaña alta. Las cuencas hidrográficas por su vital importancia como contenedores de agua se encuentran sometidas a investigaciones para determinar la tendencia de evolución de urbanismo y pérdida de vegetación natural, páramo y bosques nativos (Velázquez et al., 2002).

La Cuenca Alta del Río Guayllabamba denominada CARG para el desarrollo del presente trabajo muestra un incremento de zonas urbanas y agrícolas ocasionado por el crecimiento poblacional (Abad, 2020). Este incremento es mayor en la parte alta de la cuenca por la localización de gran parte del Distrito Metropolitano de Quito, sector que sufre una acelerada urbanización (Tucci, 2009). El cambio de uso del suelo en la CARG ha ocasionado afectación a los ciclos hidrológicos tales como evapotranspiración, intercepción, infiltración, escorrentía determinando un cambio en la disponibilidad de agua (Esse et al., 2020).

Para la determinación de la disponibilidad de agua y su relación con el uso de suelo en toda el área de la CARG se hace uso de la modelación la cual permite mostrar los distintos procesos implicados en la distribución de la lluvia y formación de caudales (Jorquera et al., 2012). Mediante el uso de datos disponibles en estaciones meteorológicas e hidrológicas se emplea la modelación hidrológica definida como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación (Solis & Cuevas, 1995).

Para el desarrollo de este trabajo se hace uso del modelo hidrológico Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (HEC- HMS por sus siglas en inglés), un programa gratuito y de amplio uso internacional (Estrada & Pacheco, 2012).

1.1 Objetivo general

Determinar mediante modelación hidrológica la influencia del cambio del uso del suelo sobre la disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba a la altura de la estación hidrológica INAMHI H-0146.

1.2 Objetivos específicos

- Establecer áreas y porcentajes de cambio de uso de suelo para la Cuenca Alta del Río Guayllabamba año 2014.
- Generar un modelo hidrológico en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba.
- Estudiar la influencia del cambio del uso del suelo sobre disponibilidad de agua en la delimitación de la Cuenca Alta del Río Guayllabamba.

1.3 Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad analizar mediante la modelación hidrológica la disponibilidad de agua en la CARG estación H-0146, como consecuencia del cambio de uso del suelo. En principio se emplea la calibración para el año 1982 realizada por Ortega (2018), mientras que también se realiza la actualización de la calibración del modelo hidrológico. Para esto es necesario el procesamiento de datos de uso del suelo del año 2014 obtenidos del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) en ArcGIS Pro. Simultáneamente se adaptarán los datos de precipitación y evapotranspiración del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de acuerdo al periodo de calibración (enero 2010 – diciembre 2014). De esta manera se conectan los diferentes datos para la incorporación en el modelo hidrológico HEC-HMS.

Para la aplicación del modelo hidrológico una vez realizada la calibración se procede con la simulación de la precipitación de un año (1982) en los subperiodos de 1982 y 2014 siendo los años donde se realizó el estudio de cambio de uso de suelo, concluyendo con la simulación produciendo el hidrograma que conlleva a la discusión de los análisis sobre disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Uso y cobertura del suelo

El suelo es el recubrimiento superficial de la tierra, delgado y vulnerable, formado en la interfase atmósfera (aire, agua, viento, etc.), litosfera (rocas, sedimentos) y biosfera (Jaramillo, 2002). Así mismo se encuentra compuesto por materia orgánica, agua, microorganismos, aire y partículas minerales. La formación del suelo es sumamente lenta requiriendo largos periodos de tiempo (miles de años), pudiendo considerarse como un recurso no renovable (FAO, 2015).

El uso de suelo se determina como el territorio caracterizado de acuerdo a la dimensión funcional planificada actual y futura, especifica las acciones del ser humano que se llevan a cabo sobre la tierra y la influencia del hombre en el ambiente para producción de bienes y servicios. En su gran parte esta combinada con la cobertura del suelo (García-Álvarez et al., 2022).

La cobertura del suelo es la cubierta física y biológica de la superficie terrestre que abarca áreas agrícolas, forestales, cuerpos de agua, artificiales, naturales, siendo establecida por factores biofísicos como el clima, estructura del suelo, clases de vegetación y disponibilidad de agua. Sin importar el tipo de cambio en la cobertura del suelo, existe variación en la diversidad biótica, calidad del suelo, productividad, tasas de escorrentía y sedimentación (García-Álvarez et al., 2022; Lambin & Geist, 2008; Pineda, 2011).

El cambio de cobertura y uso de suelo son un compendio de interacciones de componentes físicos, biológicos y sociales (Nené et al., 2017). Además de ser una consecuencia de transformaciones físicas del suelo siendo el resultado de desarrollo económico, incremento poblacional, actividades agrícolas que se desarrollan sobre la cubierta del terreno (Pineda, 2011).

Estudios sobre el cambio de la cobertura y uso de suelo aportan el sustento para entender las tendencias de procesos de desertificación, deforestación, degradación, disminución de biodiversidad (Velázquez et al., 2002). Partiendo de lo descrito se infieren escenarios sobre la pérdida de capital natural o biodiversidad, generando modelos para probables efectos de cambios globales y se puedan realizar manejos de planificación de uso del suelo (Mas et al., 2009).

El cambio de uso de suelo establece dos variantes:

- Transformación de una categoría a otra (pastizal a zona urbana)

- Cambio dentro de la misma categoría (cultivo de ciclo corto a cultivo permanente). La transformación determina una alteración visible y el cambio es más sutil entre las coberturas lo que exige un amplio nivel de especificación para ser localizada (López et al., 2001).

1.4.2 Textura del suelo

Grupo A: Predominancia de suelo arenoso, libre transferencia de agua a través del perfil, bajo potencial de escorrentía en suelos húmedos, con tasas de infiltración altas.

Grupo B: Suelos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, con escorrentía moderadamente bajo en suelos húmedos, con tasas de infiltración moderadas.

Grupo C: Suelos con capas de limitación de movimiento vertical del agua, con texturas moderadamente fina a fina, con tasas de infiltración lentas.

Grupo D: Suelos con elevado potencial de escorrentía, con texturas arcillosas, nivel freático alto, suelos con escasa profundidad, con tasas de infiltración muy lentas (Díaz Carvajal & Mercado Fernández, 2017).

Tabla 1.1. Rangos de tasas de infiltración

Grupo de suelo	Descripción	Rango de tasa de pérdida (mm/h)
A	Arenas profundas, limo agregado, loes profundo.	7,62 - 11,43
B	Loes superficial, marga arenosa.	3,81 - 7,62
C	Franco arcillosa, marga arenosa superficial, suelos con bajo contenido orgánico y suelos altos en arcilla.	1,27 - 3,81
D	Suelos que se hinchan mojados, arcillas plásticas y algunos suelos salinos.	0,00 - 1,27

Fuente: Manual Técnico de referencia HEC-HMS (Feldman, 2000)

Elaboración: Propia

1.4.3 Descripción de componentes hídricos

1.4.3.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico implica una sucesión de periodos que atraviesa el agua al traspasar de la atmosfera a la tierra y regresar a la atmosfera (Campos, 1998). Por lo tanto, es el movimiento general del agua en forma ascendente mediante la evaporación y de forma descendente mediante la precipitación, cuyos elementos son evaporación, escorrentía superficial y subterránea, precipitación, infiltración (Castañeda, 2016).

1.4.3.2 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica se determina como una delimitación territorial constituida por los lugares de más alta elevación como montañas, colinas y laderas, donde se recoge y escurre la precipitación en el sistema de drenaje superficial dirigiéndolo al río principal y por consecuente al mar (Faustino & Jiménez, 2000; Ordoñez, 2011).

- Evaporación: Cambio de estado del agua de líquido a vapor, dependencia de la radiación solar, temperatura.
- Transpiración: Vaporización del agua líquida de las plantas hacia la atmosfera.
- Evapotranspiración: Es la suma de agua convertida en vapor, que consiste en la evaporación de suelo, agua interceptada, y la transpiración de las hojas es decir la combinación de evaporación y transpiración.
- Infiltración: Procedimiento en que el agua de la superficie ingresa al suelo.
- Tasa de infiltración: Medición de la capacidad de absorción de agua al suelo en un periodo de tiempo determinado (Úbeda & Delgado, 2018).

1.4.3.3 Descripción recursos hídricos

Durante los últimos años en el mundo la importancia de los recursos hídricos ha crecido, debido a su indispensabilidad para la vida de los seres humanos, además de ser necesarios para el progreso de las actividades económicas como agricultura, industria, ganadería, etcétera (Blanco y de la Torre, 2015).

Según Auge (2007) el volumen de agua en el planeta no ha cambiado, pero si ha tenido un detrimento significativo en su calidad ocasionado por actividades antropogénicas, actividades naturales e incremento poblacional mundial que en la actualidad es de 7.700 millones de habitantes (ONU, 2022).

La disponibilidad del agua muestra la cantidad de agua neta por año que existe en una región para uso y consumo de las distintas actividades (Gil et al., 2014). Siendo una de las restricciones fundamentales para el desarrollo económico y actividad comercial en varios sectores del mundo como zonas áridas, semiáridas, alta pluviosidad y óptima calidad de agua (Urrutia et al., 2005).

En la actualidad alrededor de 2 000 millones de seres humanos padecen la falta de agua en el mundo, provocando que atraviesen escasez de la misma hasta por un mes cada año (UNESCO, 2021). La insuficiencia de agua es especialmente crítica en el Norte de África,

Este de Asia y Norte de China. En el año 1950 solo el continente de Asia afrontaba una disminución de disponibilidad de agua, la disminución del 52% al resto de continentes está estimada para el año 2025 (Auge, 2007; García et al., 2013).

En Ecuador el agua es considerada patrimonio nacional estratégico de uso público. Mediante el Plan Nacional de Recursos Hídricos y el Plan de Gestión Integral por Cuencas Hidrográficas incorporan la homogenización de información, gobernanza de gestión, agenda y planificación (Ortega, 2018).

1.4.4 Modelo hidrológico

El modelo asocia elementos hidrológicos de la salida con elementos hidrológicos de la entrada, para la representación sintetizada de un sistema real simple o complejo, mediante forma matemática o física (Feldman, 2000).

En el modelo hidrológico se realizan análisis de inundaciones y disponibilidad de agua, que ofrecen hipótesis predecibles o reales con menor incertidumbre para una elección en torno a obras de soporte cercanas a ríos para un mejor funcionamiento en el caso de fuertes lluvias, además de determinar la disponibilidad de agua en cuanto a cambios de uso de suelo en periodos de tiempos establecidos (Estrada & Pacheco, 2012).

1.4.4.1 Modelo HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic), es un software de acceso libre de más de 30 años, producido por Hydrologic Engineering Center HEC del United States Army Corps of Engineers USACE, es un modelo precipitación- escorrentía proyectado para simulación de hidrogramas de escorrentía ocasionado por lluvias leves o intensas (Feldman, 2000).

1.4.4.2 Componentes modelos HEC-HMS

- i. Datos de entrada: Sistema de ingreso de datos, para posterior tratamiento de acuerdo a diferentes submódulos de modelado según requerimiento.
- ii. Modelo de cuenca: Representa la fracción física de la cuenca. El modelador añade y une elementos hidrológicos con condición de borde usando modelos matemáticos para explicar los procesos físicos en la cuenca.
- iii. Elementos hidrológicos: Mediante las diversas opciones de modelación se establece respuestas para cada subcuenca, donde se seleccionan las más

convenientes y con mayor disponibilidad de datos para una modelación continua.

- iv. Modelo meteorológico: Destina a las subcuencas datos de precipitación, caudal, evapotranspiración, etc. Se emplea precipitaciones teóricas y reales, cuando son muchas estaciones de precipitación se calcula la media para cada subcuenca de acuerdo a las coordenadas ingresadas
- v. Modelo de especificaciones de control: Muestra el día, hora e intervalos de tiempo para la ejecución de cálculos (simulación).
- vi. Modelo de calibración: Realiza la mejora de ciertos parámetros de inicio de tal manera que sean mucho más cercanos a la realidad. Su comprobación se realiza mediante la comparación entre variables hidrológicas observadas y simuladas.
- vii. Modelo de optimización: Realiza la calibración de ciertos parámetros conforme los rangos establecidos para cada parámetro, para efectuar una mejor modelación.
- viii. Modelo de validación: Realiza la comprobación después de la calibración del modelo a través de simulaciones tal que el modelo funcione de manera correcta para los fines requeridos (Pascual & Díaz, 2016).

1.4.4.3 Métodos incluidos en HEC-HMS

Tabla 1.2. Modelos HEC-HMS

Método	Modelo	Categorización
Método Canopy	Simple Canopy	Evento, agregado, empírico, parámetro estimado
Método de volumen de escorrentía	Deficit and constant rate	Continuo, agregado, empírico, parámetro estimado
Método de escorrentía directa	SCS UH	Evento, agregado, empírico, parámetro estimado
Método de flujo base	Exponential recession	Evento, agregado, empírico, parámetro estimado
Método de enrutamiento	Lag	Evento, agregado, empírico, parámetro estimado

Fuente: (Feldman, 2000)

Elaboración: Propia

Los métodos incluidos en HEC-HMS se encuentran establecidos por los siguientes modelos (Feldman, 2000).

Método Canopy: Representa la retención de precipitación en las arboles, arbustos, pastos, cultivos que no permiten que lleguen a la superficie del suelo. La retención de la precipitación es únicamente removida por la evaporación.

- Simple Canopy: Representación simple de un dosel de plantas, donde la precipitación es retenida hasta que se sature el dosel, donde la evapotranspiración eliminara toda el agua almacenada.

Modelo de volumen de escorrentía: Se obtiene mediante el cálculo de la resta del volumen de la precipitación y el volumen de agua que intercepta, infiltra, almacena y evaporación.

- Deficit and constante rate: Emplea una capa como representación del suelo por la cual la precipitación y la evapotranspiración ingresa y extrae agua respectivamente en eventos de tormenta. Existe escorrentía cuando la cantidad de precipitación supera la capacidad de la capa. El modelo utiliza dos modos: Infiltración a lo largo de tormentas y evapotranspiración entre tormentas.

Modelo de escorrentía directa: Simulación del proceso de transformación del exceso de precipitación en escorrentía directa.

- SCS UH: Promedia las unidades hidrográficas procedentes de lluvias y escorrentías para cuencas agrícolas en todo Estados Unidos.

Modelo de flujo base: Escorrentía retenida temporalmente en la cuenca de una precipitación anterior más escorrentía de una precipitación actual.

- Exponential recession: Explica el drenaje del almacenamiento natural en la cuenca. Define la relación de Q_t flujo base en cualquier tiempo t .

$$Q_t = Q_o K^t$$

Ecuación 1.1. Caudal base al tiempo

Donde:

Q_t = Caudal base al tiempo t

Q_o = Caudal base inicial

K = Constante de decaimiento exponencial

Modelo de enrutamiento: Cálculo de elementos hidrológicos mediante transectos establecidos como flujo de canal abierto mediante ecuaciones de continuidad y momento.

- **Lag:** Establece que el hidrograma de salida es igual al hidrograma de entrada. Los flujos no disminuyen por lo tanto la forma no cambia. Es usado especialmente en canales de drenaje urbano.

1.4.5 Proceso de calibración

La calibración es el proceso que permite realizar un mejor ajuste de resultados calculados de la escorrentía observada a través de una búsqueda sistemática de datos hidrometeorológicos como la precipitación y caudales.

- **Prueba y error:** Método más utilizado mediante el cual se realiza un ajuste manual de valores de parámetros determinados por el investigador (Feldman, 2000).

1.4.6 Proceso de optimización

- **Método de búsqueda:** Minimización por medio de algoritmos para la búsqueda de parámetros óptimos.
- **Nelder and Mead:** Algoritmo que usa búsquedas directas teniendo en cuenta anteriores iteraciones. Mediante cada iteración se selecciona la que tiene más alta combinación de parámetros para disminuir la función objetivo y seguir con la siguiente iteración, es un proceso que continua hasta obtener un número máximo de iteraciones que sea superior al valor establecido.
- **Nash-Sutcliffe (NSE):** Estadística utilizada para estimar la bondad de ajuste, determina mediante un coeficiente la eficacia del modelo hidrológico tiene una variación de rango desde $-\infty$ a 1, si el valor es 1 muestra que el hidrograma simulado es igual al observado.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2}$$

Donde:

E: Coeficiente adimensional

Q_{si} : Caudal calculado en el día i (m^3/s)

Q_{oi} : Caudal observado en el día i (m^3/s)

Q_o : Promedio caudales observados en n días (m^3/s)

El coeficiente determina el nivel de ajuste entre caudales observados y simulados. Cuando $E = 1$ la simulación es óptima, cuando $E = 0$ la simulación tiene valores semejantes al promedio de caudales y cuando $E < 0$ el promedio de los caudales es mayor a la simulación.

Tabla 1.3. Categorización coeficiente NSE

NSE	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfactorio
0,4 - 0,6	Bueno
0,6 - 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: (Molnar, 2011)

Elaboración: Propia

2 METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio

El desarrollo de la presente investigación se ubica en la sierra norte del Ecuador, en la provincia de Pichincha con extensión a las provincias de Cotopaxi e Imbabura, está comprendida por siete cantones, Distrito Metropolitano de Quito, Rumiñahui, Pedro Moncayo, Mejía, Cayambe, Cotacachi y Otavalo, asimismo forma parte de la cuenca del río Esmeraldas (Tucci, 2009). La zona de estudio comprende un área de 6427,35 km² que va desde los 637 msnm hasta los 5897msnm se encuentra establecida en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba (CARG) específicamente en la estación Guayllabamba DJ Alambi (H-0146) de la red INAMHI considerada estación de cierre (Torres, 2018).

La población en la cuenca en el año 1990 era de 1.654.939 habitantes y para el año 2020 tiene un aproximado de 3.699.135 habitantes (INEC) con un incremento de 123,52%, siendo el Distrito Metropolitano de Quito el sector urbano más importante de la cuenca con una población de más de 2,8 millones de habitantes localizada en los alrededores del río San Pedro siendo el afluente con mayor repercusión sobre el río Guayllabamba por su incremento de población (Tucci, 2009).

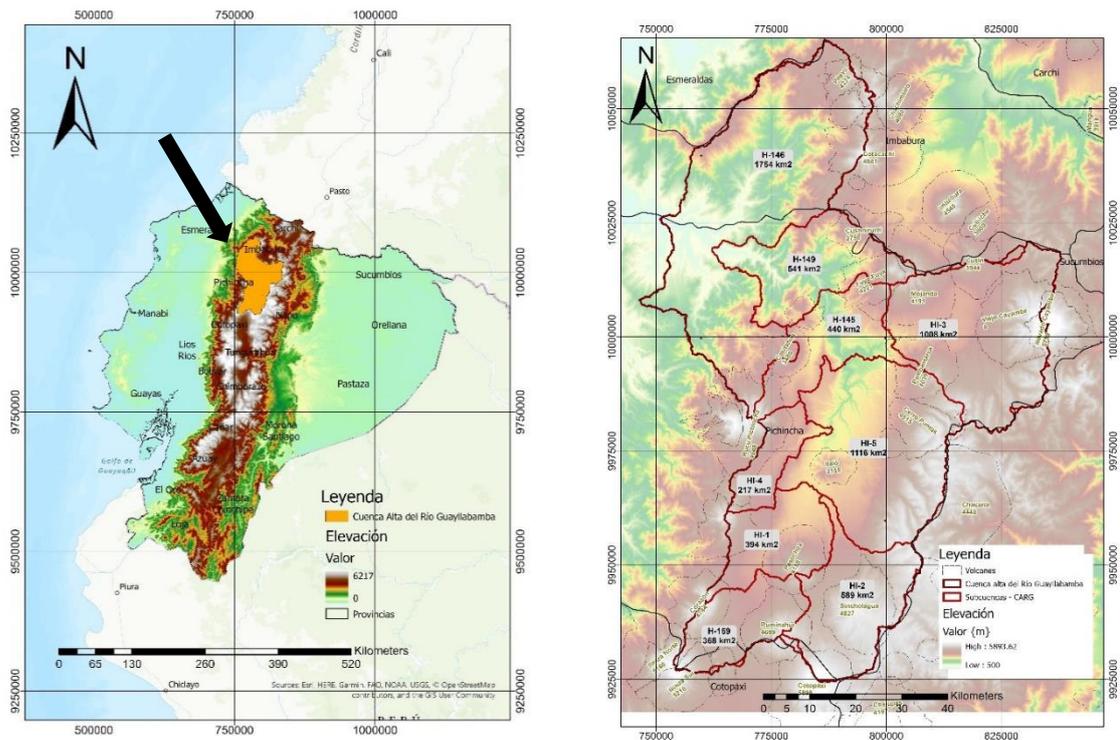


Figura 2.1. Mapas zona de estudio

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

Los topoclimas son interrelaciones entre climas y topografías es decir en su mayoría de topografía a nivel de escala, ocasionados por la hidrografía, geomorfología y elementos geográficos como ejemplo ciudades, valles (P. Guerrero, 2011).

La CARG al encontrarse en la zona sierra del Ecuador tiene presencia de valles, relieves, elevaciones ocasionando que la circulación del viento afecte los topoclimas, además de la presencia de urbanización de la cuenca en particular la del Distrito Metropolitano de Quito cuya área es la más extensa y presenta microclimas (Serrano, 2010).

2.2 METODOLOGÍA

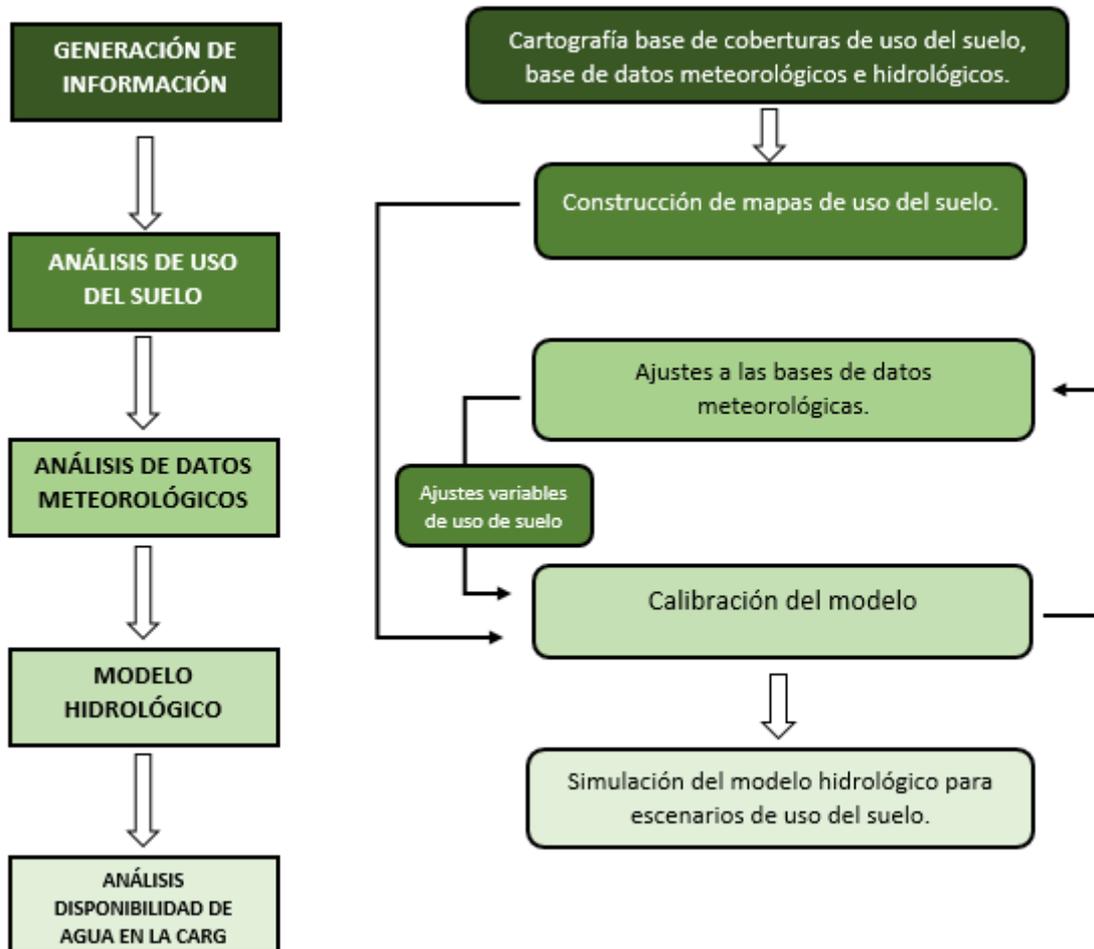


Figura 2.2. Flujograma de etapas de metodología

Elaboración: Propia

Mediante la Figura 2.2. se sintetiza las etapas que se realizaron para el desarrollo del proyecto, las cuales se detallan a mayor profundidad a continuación:

2.2.1 Generación de información

Las bases de datos de precipitación, caudal, evapotranspiración fueron obtenidas a partir de la Tesis de Maestría “EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN SATELITAL (TMPA-3B42R) SOBRE LA SIMULACIÓN HIDROLOGICA A ESCALA DIARIA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA” del Ingeniero Miguel Ortega, cuyos datos fueron previamente obtenidos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

De la misma manera para el desarrollo del proyecto, se procedió a la obtención de la cartografía base de Cobertura y uso de la Tierra de escala 1:100.000 para el año 2014 a través del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

Cabe mencionar que la cartografía base de topografía, hidrografía, información ambiental, socioeconómica de escala 1:50.000, al igual que la cartografía base de escala 1:250.000 y 1:1.000.000 de referencias a nivel regional, provincial y nacional fueron obtenidas de la recopilación de datos de la Tesis del ingeniero Miguel Ortega previamente mencionada.

2.2.2 Generación de mapas de uso de suelo

2.2.2.1. Delimitación de la Cuenca y subcuencas

La realización de la delimitación de la CARG tomó en cuenta la importancia del área de la cuenca, y la estación Guayllabamba DJ Alambi H0146 de la red del INAMHI como estación de cierre.

Mediante la subdivisión de la CARG realizada por (Ortega, 2018) se tomó en cuenta las estaciones hidrológicas con mayor cantidad de datos continuos. Mediante la distribución espacial de precipitación se revisó, corrigió y homogenizó las variables meteorológicas a través del método Vector Regional que determina zonas de similar comportamiento, es decir las estaciones se agrupan de acuerdo a las mismas condiciones de geomorfología y meteorología (Serrano, 2010). Estableciendo 9 subcuencas descritas en la Tabla 2.1. y Figura 2.3.

Tabla 2.1. Subcuencas de la CARG

SUBCUENCAS	NOMBRE
H-159	San Pedro en Machachi
HI-1	San Pedro DJ Pita
HI-2	Pita
HI-3	Pisque AJ Guayllabamba
HI-4	Machángara AJ San Pedro
HI-5	Guayllabamba DJ Coyago
H-145	Guayllabamba AJ CUBI
H-149	Guayllabamba PTE Chacapata
H-146	Guayllabamba DJ Alambi

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

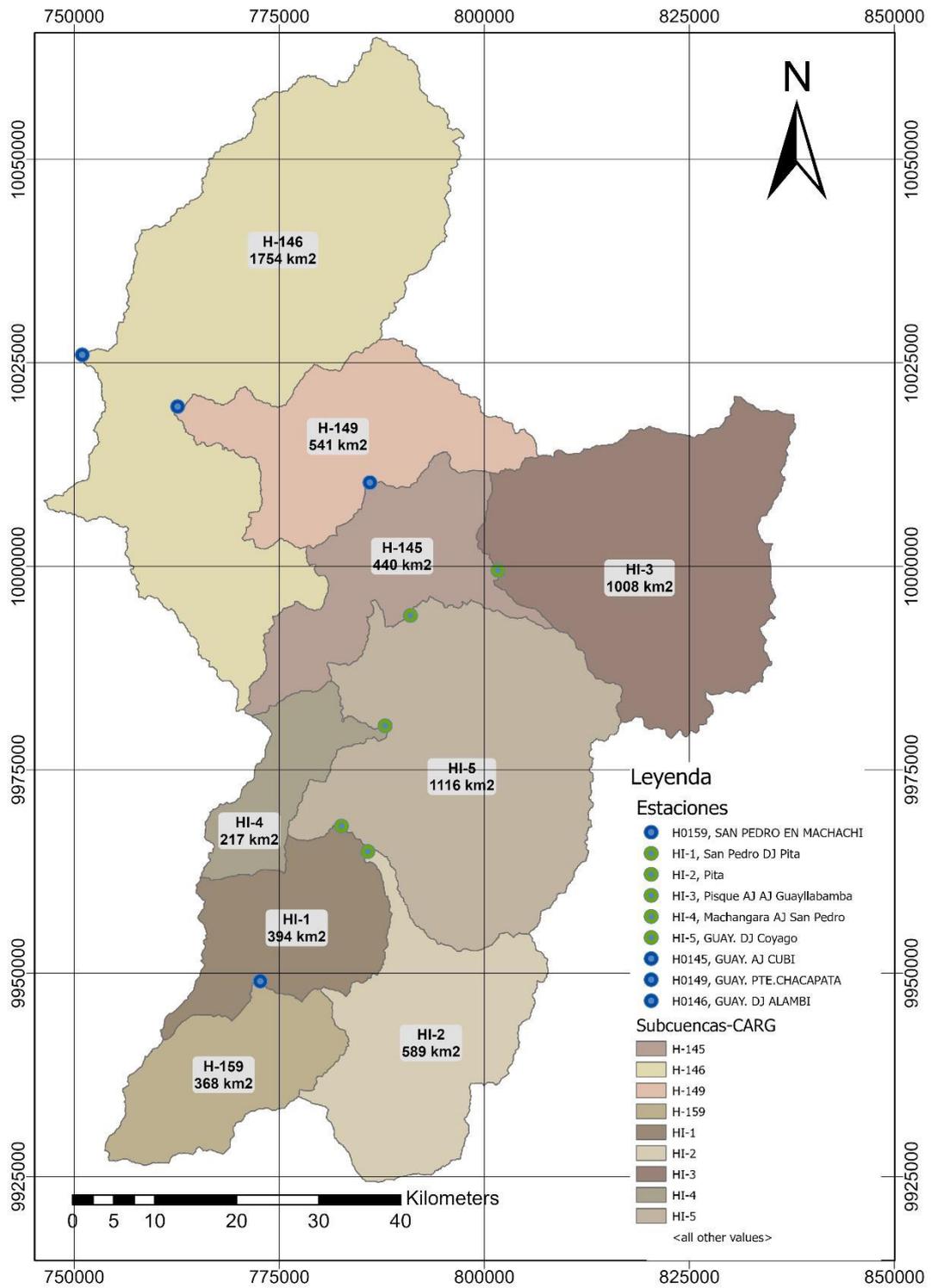


Figura 2.3. Mapa subcuencas de la CARG

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

2.2.3 Grupos hidrológicos, Cobertura y uso de suelo

2.2.3.1 Grupos hidrológicos

Un parámetro importante de la modelación es la infiltración que se estima mediante la textura del suelo. Las características físicas del suelo se pueden definir mediante su contenido, tamaño de partículas y componentes del suelo. De esta manera los grupos hidrológicos determinan conjuntos de suelos con comportamiento similar frente a escorrentías. Las tasas de infiltración se encuentran establecidas a cada grupo de suelo mediante la siguiente tabla:

Tabla 2.2. Grupos hidrológicos y tasas de infiltración

Grupo de suelo	Descripción	Tasa de pérdida (mm/h)
A	Arenas profundas, limo agregado, loes profundo.	7,62
B	Loes superficial, marga arenosa.	3,81
C	Franco arcillosa, marga arenosa superficial, suelos con bajo contenido orgánico y suelos altos en arcilla.	0,127
D	Suelos que se hinchan mojados, arcillas plásticas y algunos suelos salinos.	0,005

Fuente: (Feldman, 2000)

Elaboración: Propia

Las ponderaciones de grupos hidrológicos en la CARG para el año 1982 fueron obtenidos de la Tesis del Ingeniero Miguel Ortega, basados en la información de la Tabla 2.2., quien realizó un tratamiento en el sistema de información geográfica ArcMap, para establecer sus grupos hidrológicos mediante el agrupamiento de áreas con lo cual determinó las tasas de infiltración en cada subcuenca de la CARG mostrados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Porcentajes (%) de grupos hidrológicos en subcuencas de la CARG-1982

Subcuenca	H-159	HI-1	HI-2	HI-3	HI-4	HI-5	H-145	H-149	H-146	CARG
A	7,55	--	2,7	4,84	--	6,87	46,64	8,95	3,51	7,53
B	85,34	81,75	74,95	41,5	39,3	48,6	11,81	76,94	92,52	65,57
C	--	--	2,01	24,9	2,71	10,8	4,22	--	2,18	6,94
D	--	10,38	1,5	21,2	8,49	32,5	31,64	13,57	1,16	13,66
Nieve	0,18	--	7,7	0,57	--	--	--	--	0,04	0,82
Urbano	--	0,23	--	0,24	49,5	1,05	5,58	--	--	2,29
Res_agua	--	--	0,1	--	--	0,16	--	0,54	0,13	0,12
S/Suelo	6,93	7,64	11,04	6,79	--	--	0,11	--	0,46	3,07
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

Nota: Los valores de Nieve, Urbano, Res_agua y S/Suelo se toman valores de infiltración: 0 para Nieve, Urbano, Res_agua y 0,50 para S/Suelo.

Como menciona Echavarría (2007) las variables de infiltración necesitan largos periodos de tiempo para presentar cambios significativos, por lo cual se utilizaron los valores de tasa de infiltración presentados en la Tabla 2.2. para el desarrollo del presente trabajo en el año 2014.

2.2.3.2 Cobertura y uso de suelo

Para el año 2014 se realizó el análisis de proporción de uso de suelo mediante la obtención de cartografía base de Cobertura y uso de la Tierra de escala 1:100.000 del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

El análisis se desarrolló en el programa ArcGIS Pro. Debido a la actualización de datos para este año las categorías de uso de suelo aumentaron y cambiaron su denominación siendo: área poblada, área sin cobertura vegetal, bosque nativo, cultivo anual, cultivo semipermanente, espejos de agua natural, glaciar, mosaico agropecuario, páramo, plantación forestal, vegetación arbustiva y herbácea. Para realizar una comparativa con el año 1982 se agruparon las categorías conforme su similitud (Tabla 2.4.). Se muestra a mejor detalle las características de la clasificación de uso de suelo en el Anexo II.

Tabla 2.4. Agrupación de categorías uso de suelo

CATEGORIAS USO DEL SUELO	CLASIFICACIÓN
Cuerpos de agua	Espejos de agua natural, glaciario
Cultivos de ciclo corto	Cultivo anual, mosaico agropecuario
Cultivos permanentes	Cultivo permanente, cultivo semipermanente, plantación forestal
Mosaico de vegetación natural	Vegetación arbustiva, vegetación herbácea
Paisaje mineral	Área sin cobertura vegetal
Pastos	Pastizal
Vegetación natural	Páramo y bosque nativo
Zona urbana o sin determinar	Área poblada, infraestructura

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

2.2.4 Análisis de datos meteorológicos

2.2.4.1. Precipitación

La CARG presenta tres tipos de clima: En la parte baja de la cuenca se presenta clima Tropical semiárido temperado con variaciones de temperatura entre 16 y 24 °C, las lluvias anuales varían entre 400 y 700 mm. En la parte media de la cuenca se presenta clima Mesotérmico semi húmedo y seco con variaciones de temperatura entre 12 y 20°C con lluvias anuales entre 700 y 1500 mm. En la parte alta de la cuenca se presenta clima Ecuatorial de alta montaña con temperaturas menores a 8°C con lluvias anuales entre 1000 y 1600 mm (Tucci, 2009). Se analizaron 27 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del INAMHI Tabla 2.5. ubicadas dentro de la CARG. Sin embargo, para el desarrollo de la modelación hidrológica se han tomado 22 estaciones debido a la discontinuidad de datos que presentan las estaciones restantes.

Tabla 2.5. Estaciones de precipitación INAMHI

N	Código	Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Cantón	Estado
1	M0117	Machachi	-0,5242	-78,5406	2944	Mejía	Inactiva
2	M0120	Cotopaxi	-0,6233	-78,5814	3510	Latacunga	Activa
3	M0730	Ilulluchis	-0,6025	-78,6325	3500	Mejía	Inactiva
4	M1231	Iliniza-Bigroses	-0,6228	-78,6594	3461	Mejía	Activa
5	M0364	Loreto Pedregal	-0,5614	-78,4264	3620	Quito	Activa
6	M0353	Rumipamba-Pichincha	-0,4275	-78,4158	2940	Rumiñahui	Activa
7	M0113	Uyumbicho	-0,3883	-78,5253	2740	Mejía	Activa

8	M0003	Izobamba	-0,3667	-78,5500	3058	Mejía	Activa
9	M0354	San Juan Pichincha	-0,2847	-78,6325	3440	Quito	Activa
10	M0002	La Tola	-0,2294	-78,3667	2480	Quito	Activa
11	M0024	Quito INAMHI- Iñaquito	-0,1667	-78,4833	2789	Quito	Activa
12	M0346	Yaruqui INAMHI	-0,1597	-78,3153	2600	Quito	Activa
13	M0345	Calderón	-0,0983	-78,4208	2645	Quito	Activa
14	M0343	El Quinche	-0,1022	-78,3033	2605	Quito	Activa
15	M0009	La Victoria INERHI	-0,06	-78,2006	2262	Cayambe	Activa
16	M0344	Cangahua	-0,0572	-78,1672	3140	Cayambe	Activa
17	M1094	Tomalon-Tabacundo	0,0333	-78,2333	2790	Pedro Moncayo	Activa
18	M0359	Cayambe	0,0539	-78,1394	2840	Cayambe	Activa
19	M0023	Olmedo-Pichincha	0,1481	-78,0478	3120	Cayambe	Activa
20	M0337	San Jose de Minas	0,1689	-78,3931	2440	Quito	Activa
21	M0001	Inguincho	0,2583	-78,4008	3140	Otavaló	Activa
22	M0339	Nanegalito	0,0667	-78,6764	1580	Quito	Activa
23	M0326	Selva Alegre- Imbabura	0,2464	-78,5769	1800	Otavaló	Activa
24	M0325	García Moreno	0,2347	-78,6272	1950	Cotacachi	Activa
25	M0318	Apuela-Intag	0,355	-78,5136	1620	Cotacachi	Activa
26	M0909	Gualsaqui	0,3208	-78,4083	2710	Cotacachi	Activa
27	M0327	Chontal Bajo	0,2372	-78,7492	675	Quito	Activa

Fuente: (INAMHI, 2017)

Elaboración: Propia

Para la determinación de los valores de precipitación de las subcuencas establecidas en la CARG, se hizo uso del Método de Thiessen. Método que distribuye de manera ponderada una cobertura de puntos para producir polígonos de zonas de influencia definidas desde cada punto (Cuza-Sorolla et al., 2021). Por lo tanto, el método determina la intensidad de precipitación en puntos dentro de la cuenca y su similitud con la estación más cercana a través de polígonos formados. Las estaciones se encuentran distribuidas para cada subcuenca de la siguiente manera.

Tabla 2.6. Porcentajes (%) de ponderación de estaciones meteorológicas en subcuencas de la CARG

Estación	Subcuencas de la CARG								
	H-159	HI-1	HI-2	HI-3	HI-4	HI-5	H-145	H-149	H-146
M0001								8,0	7,9
M0002						33,9			
M0003		24,9			21,1	1,2			
M0023				18,2					
M0024					57,5	5,1	13,2		
M0113		38,5							
M0318									39,2
M0325								5,4	14,2
M0326								13,7	9,2
M0337							27,6	72,9	
M0339									29,5
M0343						11,4	16,6		
M0344				44,3		7,7			
M0345						9,6	42,6		
M0346						20,5			
M0353		23,2	39,7			10,7			
M0354					21,4				
M0359				37,6					
M0364			60,3						
M0120	11,8								
M0117	47,7	13,4							
M0730	40,5								
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

2.2.4.2. Evapotranspiración

Es el efecto de la combinación de pérdida de agua por transpiración y evaporación, siendo el fenómeno físico de transformación de estado líquido a gaseoso. La evapotranspiración depende del clima, métodos de cultivo, humedad del suelo entre otros (Hammerly, 2001). Para el presente trabajo se determinó la evapotranspiración mediante el método de los tanques el cual está compuesto por un tanque de profundidad media (25cm), diámetro (120.7cm) y una ubicación de 10cm sobre la superficie de la tierra en una plataforma de madera. La determinación del valor de la evapotranspiración se establece por la pérdida por evaporación de una superficie de agua y la utilización de coeficientes empíricos (Anexo I), además de estar asociados a la radiación, viento, temperatura y humedad relativa

produciendo una diferencia significativa en la pérdida de agua en una superficie libre o una superficie cultivada o con cubierta vegetal.

La representación de lo antes descrito se encuentra expresada de la siguiente forma:

$$ET_o = K_p \times E_{pan}$$

Donde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

K_p: Coeficiente del tanque evaporímetro

E_{pan}: Evaporación del tanque evaporímetro (mm/día)

Para la obtención del valor *K_p* se toma en cuenta la velocidad del viento, si el lugar donde se encuentra el tanque tiene cultivo, vegetación o se encuentra en una zona descubierta, además color del tanque, altura de los cultivos de los alrededores.

Las estaciones del INAMHI al contar con tanques situados en zonas despejadas de vegetación, toman un valor de corrección de 70% a través de los criterios, de humedad relativa mayor al 70%, velocidad del viento entre 2 y 5 m/s y una distancia de la vegetación de 10m.

Apartir de estos criterios se procede a trabajar con la base de datos de la Tesis del Ingeniero Miguel Ortega la evapotranspiración mediante la distribución de las estaciones meteorológicas en cada subcuenca de la CARG (Tabla 2.7.) consiguiendo la información para la modelación. Las estaciones fueron escogidas debido a la cantidad y calidad de datos.

Tabla 2.7. Distribución de estaciones meteorológicas en la CARG

Estación Subcuenca	M0001	M0002	M0003	M0023	M0024	M0120
H-159						X
HI-1			X			
HI-2						X
HI-3				X		
HI-4					X	
HI-5		X				
H-145		X				
H-149	X					
H-146	X					

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

2.2.5 Modelo Hidrológico

La construcción del modelo permite calibrar y analizar a través del uso del suelo, la respuesta hidrológica en la cuenca. Para realizar la modelación se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS, ya que su capacidad de manejo de datos de entrada y su relación con datos fisiográficos de la cuenca es óptimo.

2.2.5.1 Criterios para la modelación hidrológica

Se realizó la selección de datos para el ingreso al modelo hidrológico, considerando periodo de calibración y periodo de análisis.

1. Para el primer periodo de calibración se definió los valores de precipitación, evapotranspiración y caudal con series de datos diarias continuas y confiables, para el periodo de tiempo 1 de julio de 1981 a 31 de agosto de 1985.
2. Para el segundo periodo de calibración se definió los valores de precipitación, evapotranspiración y caudal con series de datos diarias continuas y confiables, para el periodo de tiempo 1 de enero del 2010 a 31 de diciembre del 2014.
3. El periodo de simulación de caudal se realizó mediante el uso de la precipitación del año 1982, tanto para el escenario de uso del suelo del año 1982 y el escenario de uso del suelo del año 2014.

2.2.5.2 Configuración para la realización de la calibración mediante modelos de cuenca, modelos meteorológicos, control de especificación y datos de series de tiempo en el modelo hidrológico HEC-HMS

Para la selección del período de calibración se tomó en cuenta el periodo con menor cantidad de datos faltantes estableciéndose el periodo desde el 1 de enero de 2010 a 31 de diciembre de 2014, además de tener la influencia del uso del suelo. Una vez establecidas las condiciones de parámetros y periodo de tiempo se procedieron a cargar la información en el modelo hidrológico HEC-HMS.

1. Modelo de Cuenca

En el modelo hidrológico HEC-HMS se procedió a cargar la cuenca y desarrollar el componente modelo de cuenca que se encuentra establecido por subcuencas, uniones, tramos y salidas. Se toman como cuencas de cabecera a las subcuencas H-159 y HI- 2, que se unen mediante tramos a las subcuencas consecuentes, al encuentro entre

dos o más subcuencas se denomina unión, al realizar el proceso mencionado en toda la cuenca se llega a la salida donde se encuentra la confluencia total de caudales, esta salida se la denomina punto de cierre H0146, el esquema se presenta en la siguiente figura.

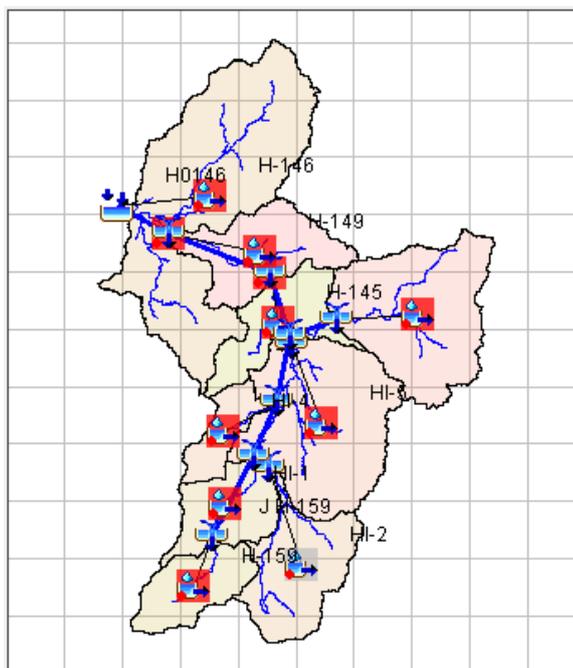


Figura 2.4. Esquema de la CARG en HEC-HMS.

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

2. Modelo Meteorológico

El modelo meteorológico emplea datos de precipitación y evapotranspiración en cada una de las subcuencas, donde se les asigna ponderaciones en el caso de evapotranspiración y porcentajes de pesos en el caso de la precipitación, estableciendo de esta manera condiciones de base para la simulación del modelo en HEC-HMS.

- **Método de Precipitación**

Para la realización del método de precipitación se utilizó el método Gage Weights que establece porcentajes de incidencia de las estaciones meteorológicas sobre cada una de las subcuencas, los valores de estos porcentajes se encuentran explicados y representados en la Tabla 2.6, posteriormente fueron ingresados al modelo de forma manual.

- **Método de Evapotranspiración**

Los datos ingresados en el método de evapotranspiración fueron obtenidos al realizar el promedio mensual multianual de la base de datos en el periodo 2010 – 2014, para cada subcuenca. Los valores se muestran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Estaciones de evapotranspiración potencial (mm) INAMHI - 2014

MES	ESTACIONES					
	M0001	M0002	M0003	M0023	M0024	M0120
ENERO	74,93	83,26	76,29	68,48	79,13	28,49
FEBRERO	61,31	69,52	55,47	63,96	60,40	47,32
MARZO	75,73	71,56	67,61	55,02	64,86	39,55
ABRIL	69,90	64,49	62,74	59,03	58,96	46,13
MAYO	71,72	76,47	63,13	54,58	70,10	16,38
JUNIO	75,03	87,26	74,06	61,21	78,12	18,71
JULIO	78,59	103,38	92,41	67,22	86,81	22,58
AGOSTO	83,54	115,11	96,40	71,61	93,88	24,01
SEPTIEMBRE	84,86	104,50	91,14	70,08	86,83	24,64
OCTUBRE	75,24	88,67	76,01	69,09	75,03	23,46
NOVIEMBRE	69,57	73,74	69,85	60,03	63,94	17,43
DICIEMBRE	71,85	76,29	73,19	66,15	68,48	35,19

Fuente: (INAMHI, 2015)

Elaboración: Propia

3. Control de especificaciones

Se creó las especificaciones de control con fecha de inicio de 01 enero de 2010 y finalización de 31 diciembre de 2014, tiempo inicial de 00:00, tiempo final de 00:00 e intervalo de tiempo de 1 hora.

4. Datos de series de tiempo

En este módulo se procedió a colocar los datos diarios de precipitación de las 22 estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio (Tabla 2.5.) y los datos diarios de caudal de las 4 estaciones hidrológicas de la CARG de forma manual.

2.2.5.2 Etapa de calibración

El presente trabajo necesitó dos calibraciones en periodos diferentes, para poder comparar la influencia del cambio de uso del suelo sobre la disponibilidad del agua.

La calibración inicial fue realizada por el Ingeniero Miguel Ortega para el año 1982, con el uso de la precipitación del periodo 1 de julio de 1981 hasta el 31 agosto de 1985 (Figura 2.5.) en la cual mediante aumento y disminución de los distintos usos del suelo se obtuvieron los valores de los parámetros presentados en la Tabla 2.12.

La calibración del modelo hidrológico para el año 2014 se realizó de forma manual usando varias veces el método prueba - error partiendo de los valores de la calibración realizada en el año 1982 (Tabla 2.12.). En este caso se utilizaron los valores de precipitación del 1 de enero 2010 hasta el 31 de diciembre de 2014 (Figura 2.6.).

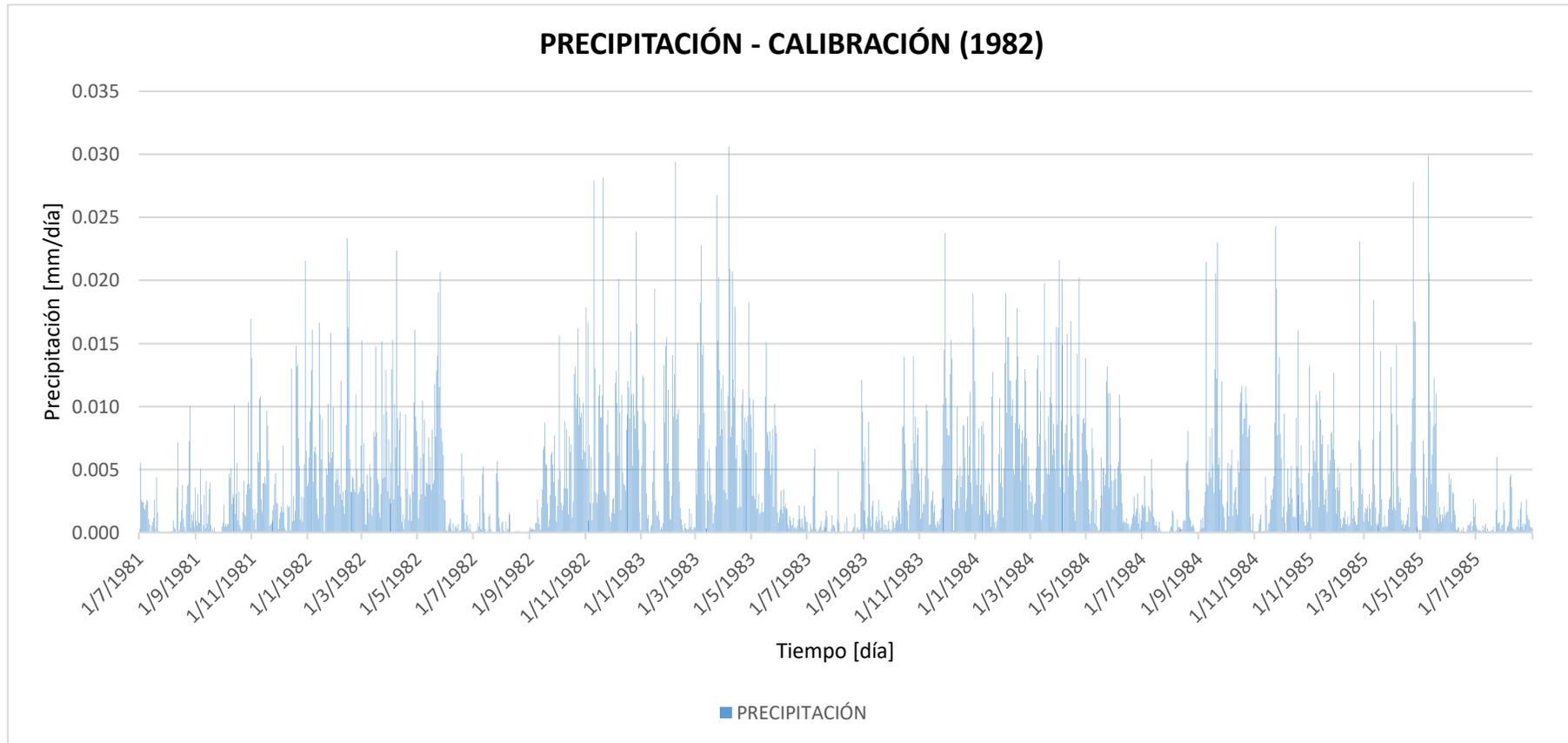


Figura 2.5. Precipitación primera calibración (1982)

Elaboración: Propia

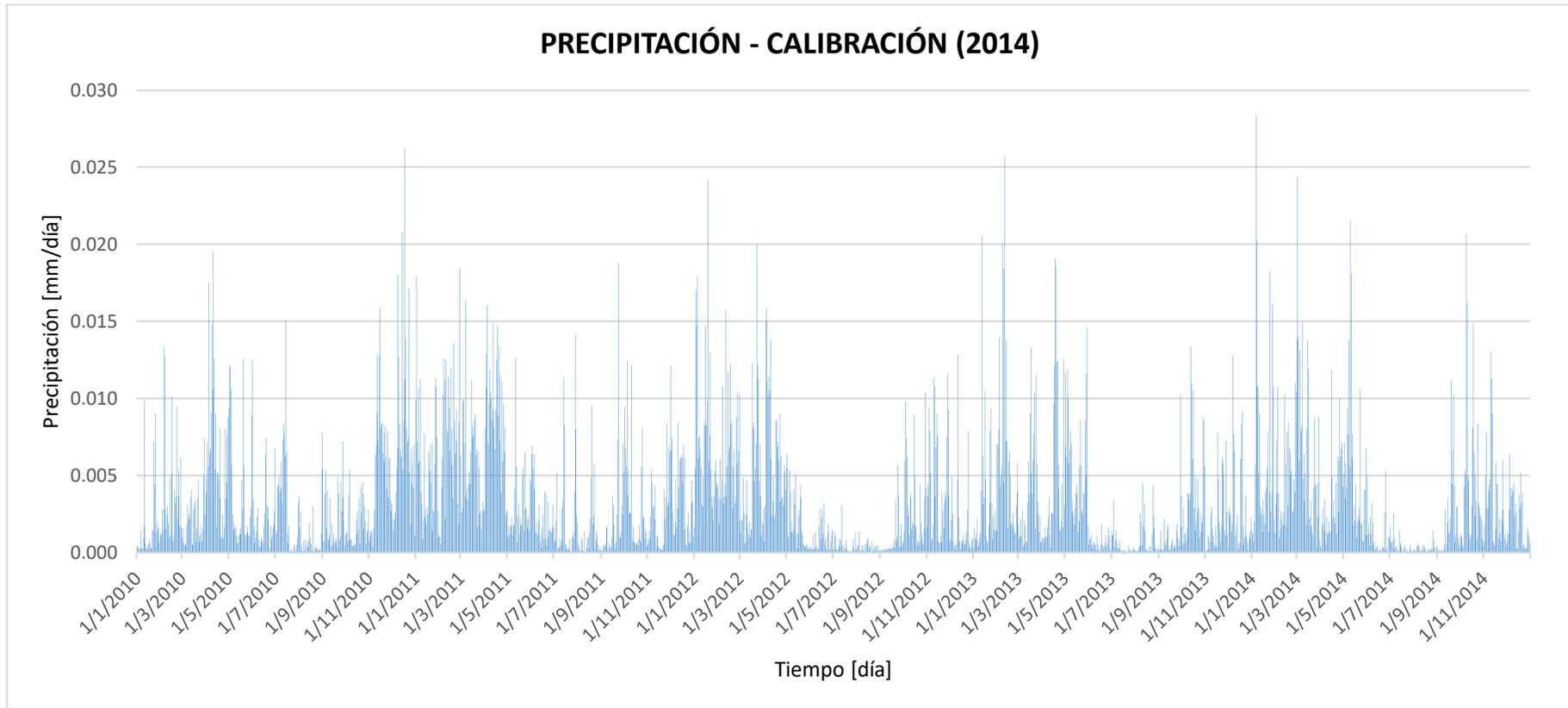


Figura 2.6. Precipitación segunda calibración (2014)

Elaboración: Propia

2.2.5.2.1 Parámetros de calibración

Tabla 2.9. Descripción parámetros de calibración

Elemento	Método	Descripción
CANOPY	Simple Canopy	Representa la intercepción en la vegetación antes que el agua llegue al suelo.
Volumen de escorrentía superficial	Deficit and constant rate	Representa el déficit de humedad, tasas de infiltración en el suelo.
Escorrentía directa	SCS Unit Hydrograph Model	Representa la respuesta a un evento de lluvia produciendo un pico en el hidrograma.
Flujo Base	Exponential Recession Model	Representa el drenaje de almacenamiento natural en la cuenca hidrográfica.
Tránsito	Lag Routing	Representa el movimiento del caudal, desde el punto de salida de la subcuenca hasta el punto de convergencia aguas abajo.

Fuente: (Feldman, 2000)

Elaboración: Propia

Tabla 2.10. Rangos de valores de parámetros usados en la calibración

Método	Parámetros	Mínimo	Máximo
Canopy	Initial Storage (%)	0	100
	Max Storage (mm)	0.001	1500
	Crop Coefficient	0	1
Loss	Initial Deficit (mm)	0	500
	Maximum Deficit (mm)	0	500
	Constant rate (mm/h)	0	300
	Impervious (%)	0	100
Transform	Lag Time (min)	0	30000
Baseflow	Initial Discharge (m ³ /s)	0.01	10000
	Recession Constant	0.000011	
	Ratio	0	1

Fuente: (Feldman, 2000)

Elaboración: Propia

Para la calibración del modelo para el año 2014 se estableció el periodo de tiempo desde enero de 2010 a diciembre de 2014 donde se dispuso de 11 parámetros con rangos de

valores descritos en la tabla 2.14. De los valores obtenidos de la calibración previa se modificaron 5 parámetros (Initial storage, max storage, constant rate, impervious, initial discharge) mismos que fueron modificados de acuerdo a los mapas de uso de suelo y porcentajes de aumento o disminución de vegetación natural, pastos, mosaico de vegetación natural, zona urbana, cultivos de ciclo corto, cultivos de ciclo permanente, paisaje mineral y cuerpos de agua.

2.2.5.3 Etapa de optimización

Una vez realizada la calibración manual prueba - error se procedió a optimizar los parámetros mediante la calibración automática la cual comprende del cambio de los parámetros del modelo hidrológico, con el fin de determinar su sensibilidad hasta obtener resultados óptimos con el objeto de mejorar el valor Nash Sutcliffe y obtener una máxima aproximación entre caudal observado y caudal simulado.

La calibración automática se realizó mediante la siguiente configuración Tabla 2.15:

Tabla 2.11. Elementos configurados calibración automática

Método de búsqueda	Nelder Mead
Tolerancia	0,001
Máximas Iteraciones	200
Función objetivo	Nash Sutcliffe
Periodo de comparación	enero 2010-diciembre2014
Intervalo de tiempo	1 hora

Fuente: (Feldman, 2000)

Elaboración: Propia

Tabla 2.12. Valores de partida para calibración modelo hidrológico HEC-HMS

MODELOS \ SUBCUENCAS		HI-2	H-159	HI-1	HI-4	HI-5	HI-3	H-145	H-149	H-146
		CANOPY	Inicial storage (%)	65	75	45	50	55	55	40
	Max storage (mm)	1	1,2	1	0,7	0,6	1	0,6	1,2	1,35
	Crop coefficient	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LOSS	Initial deficit (mm)	0,1	0,3	0,3	0,5	0,1	0,3	0,1	0,33	0,3
	Maximum deficit (mm)	0,29	1,9	0,81	1,5	0,81	0,75	0,33	0,69	0,8
	Constant rate (mm/h)	1,398	0,86948	1,36	1,482	1,3696	1,22	1,3474	2,55	2,62
	Impervious (%)	3,5	7	6,5	32	7	8	7,5	3,5	10
TRANSFORM	Lag Time (min)	296	191	194	188	305	290	191	260	329
BASEFLOW	Initial discharge (m ³ /s)	6	5,7	6	5	7	12	5	14,5	50
	Recession constant	0,98674	0,96639	0,971	0,95064	0,96021	0,97949	0,96905	0,98898	0,94062
	Ratio	0,75242	0,83706	0,755	0,41	0,54706	0,5407	0,55582	0,83019	0,8967

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

2.2.5.4 Construcción de escenario

Una vez establecida la calibración se construyó dos escenarios con variación de uso de suelo, los periodos de simulación se establecieron para los años 1982 y 2014. La construcción de escenarios se realizó en el modelo hidrológico HEC-HMS.

Los parámetros con mayor sensibilidad en el modelo son infiltración, impermeabilidad e intercepción debido a que al ser sometidos a cambios de valor en la etapa prueba – error determinaron que al aumentar el valor de infiltración e impermeabilidad aumenta la respuesta de caudal, caso contrario ocurre con la intercepción que al aumentar este valor disminuye el caudal. Por lo cual estos parámetros describen de una mejor manera como el suelo facilita la movilización del agua y permite realizar una simulación más aproximada a la realidad.

2.2.5.4.1 Escenario cambio uso de suelo

Para la construcción de los escenarios se tomó los valores de la serie diaria de precipitación del año 1982. Los valores de precipitación promedio para toda la CARG fueron obtenidos mediante la suma de la precipitación ponderada por área de la superficie de las 9 subcuencas y dividiendo el valor total por la suma de los pesos. Los escenarios de cambio de uso de suelo se realizaron en el modelo hidrológico HEC-HMS, donde se efectuó la simulación en los modelos ya calibrados para los años 1982 y 2014 respectivamente.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Cambio de uso del suelo

Para la realización de la modelación, un parámetro también importante es la cobertura y uso del suelo la cual se determinó para los años 1982 y 2014. Para el año 1982 la distribución de uso de suelo en las subcuencas de la CARG fue obtenida mediante la base de datos del Ingeniero Miguel Ortega, se muestra su distribución en la Tabla 3.1 y Figura 3.1.

Tabla 3.1. Porcentaje (%) uso de suelo en la CARG año 1982

USO DE SUELO	H-159	HI-1	HI-2	HI-3	HI-4	HI-5	H-145	H-149	H-146	TOTAL CARG
Cuerpos de agua	--	--	--	--	--	--	--	0,45	--	0,04
Cultivos de ciclo corto	12,69	18,46	0,20	29,84	7,35	20,15	27,93	15,23	1,53	13,90
Cultivos permanentes	2,99	--	--	--	7,39	5,33	17,91	4,93	18,42	8,00
Mosaico de vegetación natural	--	--	--	--	--	--	0,07	17,48	19,15	6,69
Paisajes minerales	2,92		6,90	0,65	--	1,16	--	--	--	1,11
Pastos	41,38	53,34	17,57	16,02	13,68	23,80	1,96	1,24	3,24	15,46
Vegetación natural	40,02	20,87	75,27	53,49	16,22	45,12	45,25	60,68	57,66	51,23
Zona urbana o sin determinar	--	7,33	0,05	--	55,35	4,44	6,88	--	--	3,56

Fuente: (Ortega, 2018)

Elaboración: Propia

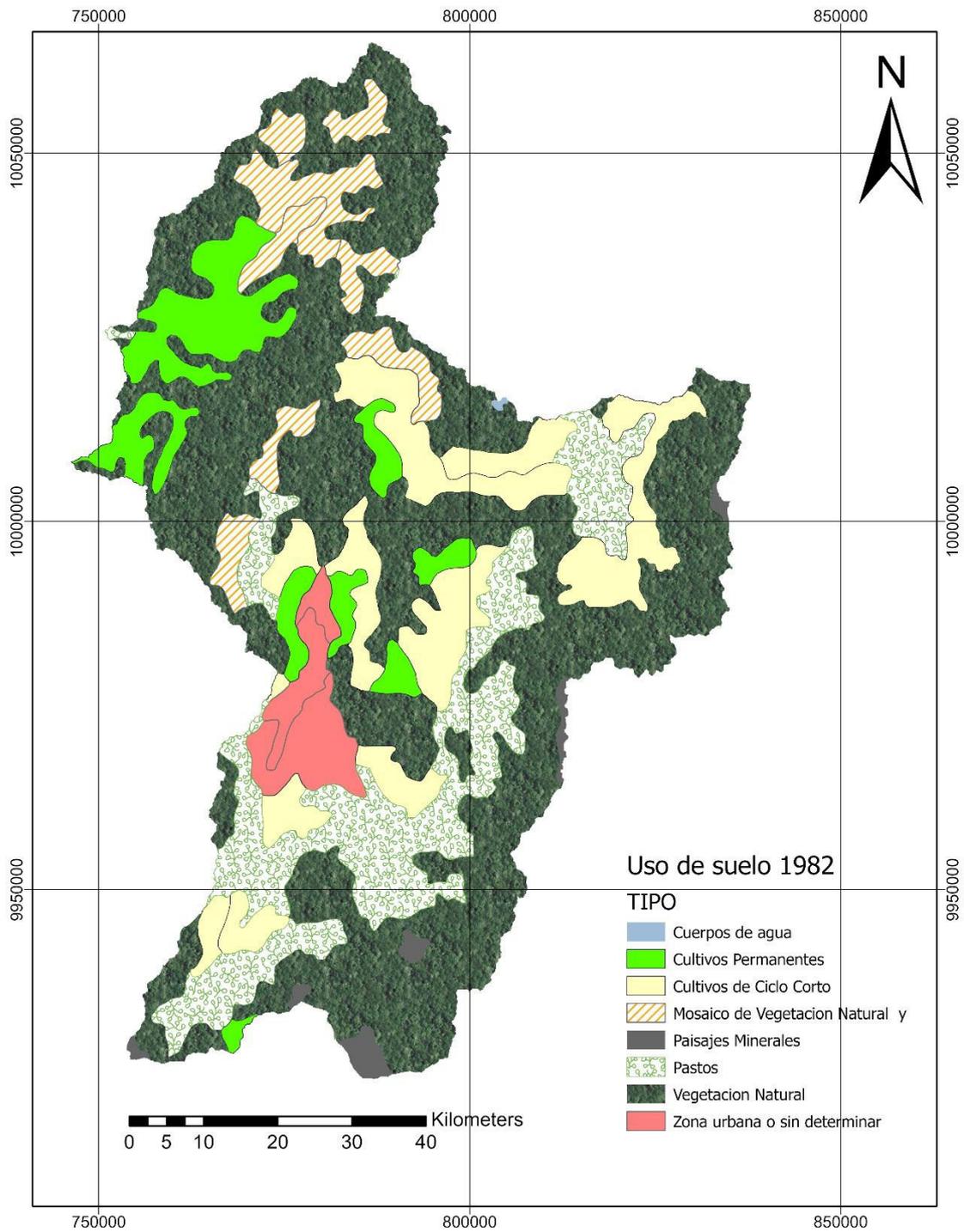


Figura 3.1. Mapa uso del suelo en la CARG 1982

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

Los cambios de uso del suelo han sido representativos debido al aumento poblacional en la CARG ocasionando que aumenten o disminuyan los tipos de uso de suelo, en la Tabla 3.2. y Figura 3.2. se muestra el porcentaje de cada uso de suelo en las subcuencas de la CARG.

Tabla 3.2. Porcentaje (%) uso de suelo en la CARG 2014

USO DE SUELO	H-159	HI-1	HI-2	HI-3	HI-4	HI-5	H-145	H-149	H-146	TOTAL CARG
Cuerpos de agua	0,02	--	0,90	0,30	0,21	0,20	0,29	0,89	0,26	0,34
Cultivos de ciclo corto	21,25	13,69	3,42	16,83	2,59	13,51	16,47	8,23	23,22	15,60
Cultivos permanentes	4,47	5,51	0,57	2,61	9,41	4,71	3,88	1,11	2,80	3,32
Mosaico de vegetación natural	5,24	10,83	5,37	13,97	6,56	19,94	41,17	21,84	1,98	12,53
Paisajes minerales	0,93	0,01	11,88	0,34	--	0,15	0,39	0,06	0,06	1,27
Pastos	35,44	37,48	13,78	20,91	14,65	23,38	11,69	29,59	16,66	21,26
Vegetación natural	27,34	14,42	63,79	39,20	5,74	23,55	5,00	37,28	54,70	37,13
Zona urbana o sin determinar	5,31	18,06	0,29	5,84	60,84	14,56	21,12	1,01	0,32	8,56

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

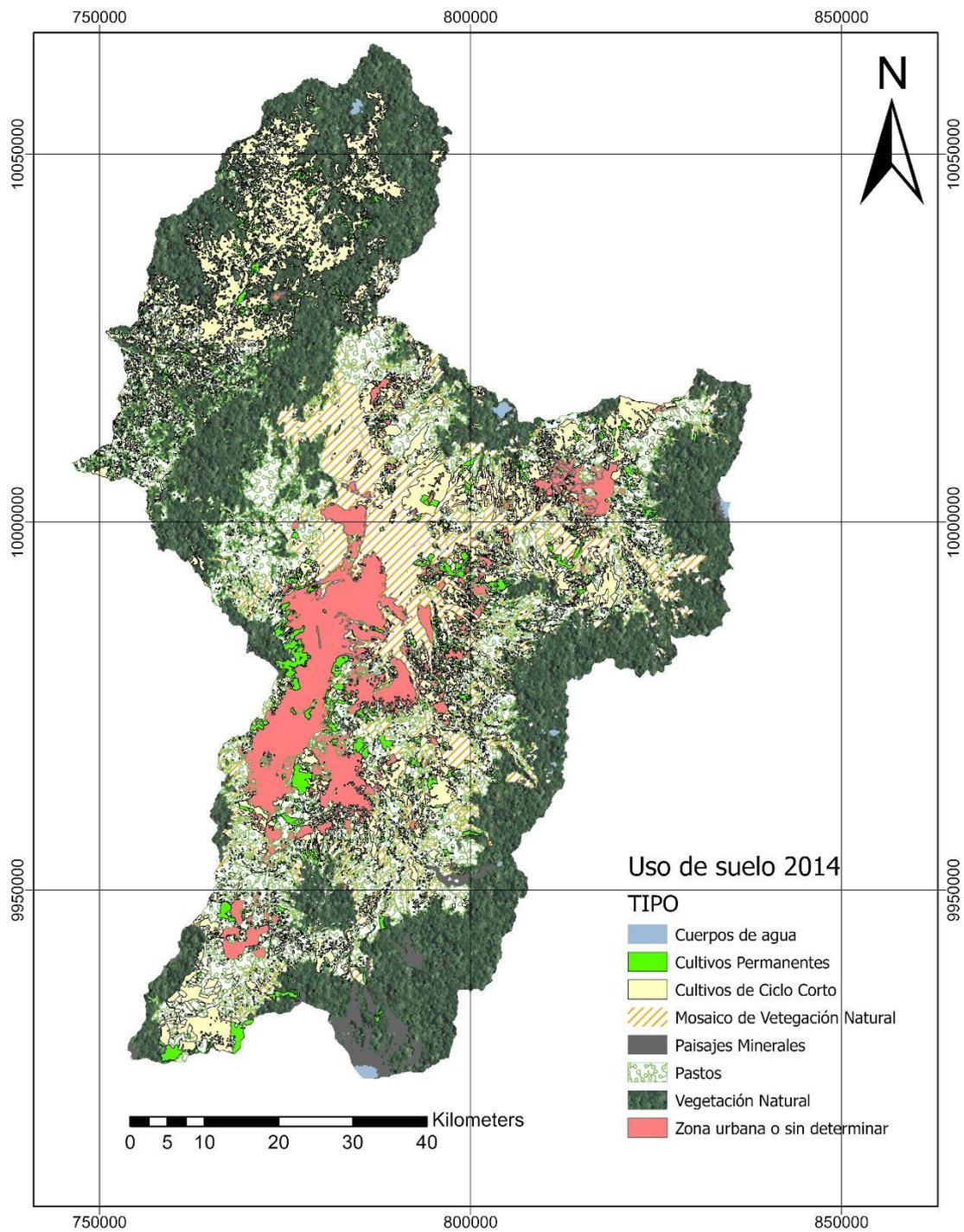


Figura 3.2. Mapa de Uso de Suelo en la CARG año 2014

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

En cada subcuenca se identifica como altera la cobertura y uso del suelo en el aumento o disminución de la respuesta hidrológica, ocasionando mayor impacto sobre los parámetros del modelo que hacen referencia a la infiltración, interceptación e impermeabilidad. En la Tabla 3.3. se muestran los porcentajes de variación del uso del suelo entre los años 1982 – 2014 y en la Figura 3.3. se presenta los porcentajes de uso del suelo en la CARG, en el Anexo III se presenta las figuras de cada subcuenca y sus usos de suelo.

Tabla 3.3. Porcentajes (%) de aumento o disminución de uso de suelo en las subcuencas de la CARG

USO DE SUELO	H-159	HI-1	HI-2	HI-3	HI-4	HI-5	H-145	H-149	H-146	CARG
Cuerpos de agua	0,02	0,00	0,90	0,30	0,21	0,20	0,29	0,44	0,26	0,30
Cultivos de ciclo corto	8,56	-4,77	3,22	-13,01	-4,76	-6,64	-11,46	-7,00	21,69	1,67
Cultivos permanentes	1,48	5,51	0,57	2,61	2,02	-0,62	-14,03	-3,82	-15,62	-4,68
Mosaico de vegetación natural	5,24	10,83	5,37	13,97	6,56	19,94	41,10	4,36	-17,17	5,83
Paisajes minerales	-1,99	0,01	4,98	-0,31	0,00	-1,01	0,39	0,06	0,06	0,17
Pastos	-5,94	-15,86	-3,79	4,89	0,97	-0,42	9,73	28,35	13,42	5,77
Vegetación natural	-12,68	-6,45	-11,48	-14,29	-10,48	-21,57	-40,25	-23,40	-2,96	-14,04
Zona urbana o sin determinar	5,31	10,73	0,24	5,84	5,49	10,12	14,24	1,01	0,32	4,99

Fuente: (MAATE, 2014)

Elaboración: Propia

Nota: Los valores con signo negativo corresponden a la disminución de uso del suelo entre los años 1982 y 2014.

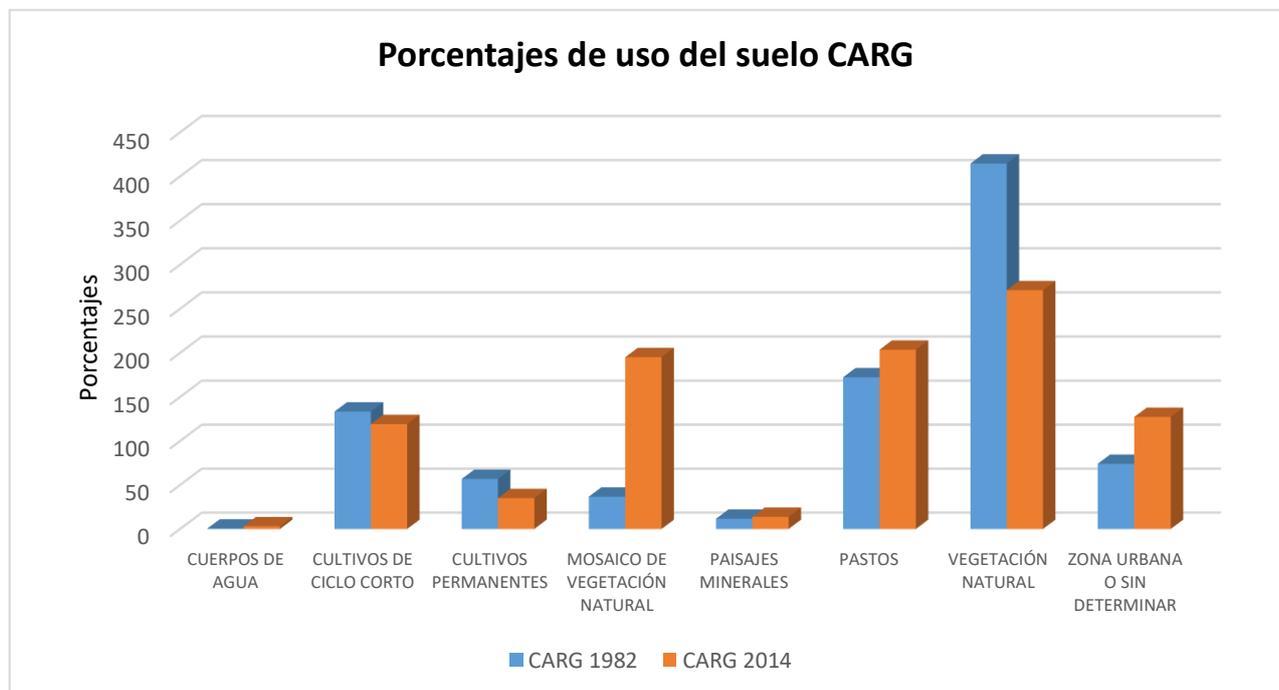


Figura 3.3. Porcentajes de uso del suelo CARG (1982-2014)

Las estimaciones de la Tabla 3.3. contribuyen a la determinación de los rangos de valores de las tasas de infiltración, que se encuentran relacionados a los grupos hidrológicos de la Tabla 2.3. Se realiza un ajuste de acuerdo a las estimaciones establecidas en la Tesis del Ingeniero Miguel Ortega para el año 1982 donde se toma en cuenta la variación de los usos de suelos en cada subcuenca ya que como muestra la Tabla 3.3. al existir disminución de 14,04% de vegetación natural y 5,77% de aumento en pastizal contribuye a los cambios en las características hidrodinámicas. Por consiguiente, se muestran en la Tabla 3.4. los valores sugeridos para los años 1982 y 2014 de los rangos de tasas de infiltración conforme al uso de suelo de la Tabla 3.2.

Tabla 3.4. Rangos de tasa de infiltración modificados por uso de suelo.

Rango de tasas de infiltración (mm/h)		
Subcuenca	1982	2014
H-159	0,800 - 1,200	0,800 - 1,000
HI-1	0,800 - 1,300	0,800 - 1,300
HI-2	0,900 - 1,500	0,400 - 1,000
HI-3	0,900 - 1,500	1,000 - 1,300
HI-4	1,000 - 2,000	1,000 - 1,500
HI-5	0,900 - 1,500	1,000 - 1,400
H-145	1,000 - 2,000	1,000 - 1,300
H-149	1,500 - 2,500	1,500 - 2,300
H-146	1,500 - 2,500	1,500 - 2,400

Elaboración: Propia

Se tomó como partida el uso de suelo del año 1982 donde se tiene 51,23% de vegetación natural, seguido de 15,46% de pastos, 13,90% de cultivos cortos, 8 % de cultivos permanentes, 6,69% de mosaico de vegetación natural, 3,56% de zona urbana 1,11% de paisajes minerales y 0,04% de cuerpos de agua.

La principal ocupación del suelo en la cuenca para el año 2014 fue la vegetación natural (37,13%), distribuida en cada una de las subcuencas, con mayor predominancia en la parte alta de la cuenca, los pastos son el segundo uso de suelo con mayor predominancia en la parte baja y media de la cuenca (21,26%), continúan en importancia los cultivos de ciclo corto (15,60%), el mosaico de vegetación natural (12,53%) presenta una mayor predominancia en la parte media de la cuenca, la zona urbana (8,56%) tiene predominancia

en la parte media y baja de la cuenca, los cultivos permanentes (3,32%), paisaje mineral (1.27%) y cuerpos de agua (0,34%) se encuentran en menor proporción en toda la cuenca (Tabla 3.5, Figura 3.2.).

Tabla 3.5. Porcentajes de variación uso del suelo en la CARG en los años 1982 - 2014

USO DE SUELO	Área (km²) uso de suelo 1982	Porcentaje (%) uso de suelo 1982	Área (km²) uso de suelo 2014	Porcentaje (%) uso de suelo 2014	Cambio de uso de suelo (%) 1982-2014	Tasa de cambio anual (%) 1982-2014
CUERPOS DE AGUA	2,44	0,04	21,71	0,34	750,00	-7,08
CULTIVOS DE CICLO CORTO	893,68	13,93	1002,60	15,60	12,23	-0,36
CULTIVOS PERMANENTES	514,41	8,00	213,11	3,32	-58,50	2,72
MOSAICO DE VEGETACIÓN NATURAL	429,99	6,69	805,34	12,53	87,29	-1,98
PAISAJES MINERALES	71,19	1,11	81,56	1,27	14,41	-0,43
PASTOS	993,96	15,46	1366,44	21,26	37,52	-1,00
VEGETACIÓN NATURAL	3292,58	51,23	2386,55	37,13	-27,52	1,00
ZONA URBANA O SIN DETERMINAR	229,11	3,56	550,05	8,56	140,45	-2,77

Elaboración: Propia

Al comparar los periodos de estudio año 1982 y año 2014 se establece que el principal cambio de uso de suelo se encuentra en la vegetación natural que se transformó principalmente en cultivos de ciclo corto, pastos y mosaico de vegetación natural con una disminución de 27,52% en 32 años, estableciendo una tasa de pérdida del 1% anual, mediante estudios similares relacionados a la deforestación establece que hay una pérdida de 0,77% en el Ecuador en cuanto a bosques nativos que se encuentran dentro de la categoría de vegetación natural (MAATE, 2016). La vegetación natural se encuentra en mayor cantidad en la parte alta de la cuenca (1012,99 km²) debido a su poca accesibilidad. A través de un estudio realizado en Pedro Moncayo montaña del Norte de Ecuador con características similares a la cuenca de estudio, en el periodo de 1990-2014 se obtuvieron resultados de disminución de vegetación natural del 40% y 16% (Guarderas et al., 2022).

De igual manera hubo un incremento de 37,52% con una tasa de incremento de 1% anual de pastos donde antes predominaba vegetación natural, cultivos de ciclo corto, cultivos permanentes y mosaico de vegetación natural, debido a que están al aire libre y facilitan la transformación de uso del suelo, por consiguiente se facilita la realización de prácticas de rotación de áreas de pastoreo (Guerrero et al., 2018).

La zona urbana tuvo un incremento de 140,45%, estableciendo una tasa de aumento anual de 2,77%, esto debido a que la población de la cuenca incremento 153,22%, con una expansión a las zonas de páramo principalmente en la cordillera occidental (De Bièvre, 2000; INEC, 2010). Donde antes el uso de suelo pertenecía a cultivos de ciclo corto, cultivos permanentes y pastos, se han construido obras civiles como vías de comunicación asfaltadas, viviendas, etc.

El mosaico de vegetación natural al estar constituido por plantas nativas, matorrales no necesita cuidados especiales para su desarrollo por lo cual presenta un incremento de 87,29% y una tasa de aumento anual de 1,98%, su incremento se produjo en su mayoría donde antes predominaba vegetación natural.

Los cultivos permanentes tuvieron un decremento del 58,50% y una tasa de pérdida anual de 2,72% ocasionado por las transformaciones principalmente de pastos, cultivos de ciclo corto y en menor proporción de mosaico de vegetación natural.

Los cultivos de ciclo corto tuvieron un incremento de 12,23% y una tasa de aumento anual de 0,36%, ocasionada por la transformación donde antes predominaba pastos y mosaico de vegetación natural, debido al aumento poblacional y la necesidad de alimentación por lo cual optan por la siembra de cultivos de cosecha de una o más veces al año.

Los cuerpos de agua tienen un incremento de 750% y una tasa de aumento anual de 7,08% ocasionado por las actividades antrópicas dedicadas al crecimiento de animales de pastoreo que beben agua de fuentes artificiales.

Los paisajes minerales tuvieron un incremento del 14,41% y tasa de aumento de 0,43%, ocasionado por la erosión del suelo.

3.1.2 Resultados de calibración

Una vez realizada la configuración de calibración automática se procedió a la corrida del modelo obteniendo los valores de parámetros optimizados, mismos que se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores optimizados modelo hidrológico HEC-HMS

MODELOS \ SUBCUENCAS		HI-2	H-159	HI-1	HI-4	HI-5	HI-3	H-145	H-149	H-146
		CANOPY	Inicial storage (%)	55,08	51,23	31,09	17,69	28,7	40,32	4,42
	Max storage (mm)	0,85	0,82	0,69	0,25	0,31	0,73	0,07	0,74	1,28
	Crop coefficient	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LOSS	Initial deficit (mm)	0,1	0,3	0,3	0,5	0,1	0,3	0,1	0,33	0,3
	Maximum deficit (mm)	0,29	1,9	0,81	1,5	0,81	0,75	0,33	0,69	0,8
	Constant rate (mm/h)	0,44618	0,84682	1,26154	1,4214	1,3264	1,2133	1,2813	2,2513	2,4325
	Impervious (%)	3,79	5,31	16,01	35,18	22,95	5,84	23,02	1,01	0,32
TRANSFORM	Lag Time (min)	296	191	194	188	305	290	191	260	329
BASEFLOW	Initial discharge (m ³ /s)	3,11	1,14	3,07	1,69	3,47	7,84	2,05	7,57	30,02
	Recession constant	0,98674	0,96639	0,971	0,95064	0,96021	0,97949	0,96905	0,98898	0,94062
	Ratio	0,75242	0,83706	0,755	0,41	0,54706	0,5407	0,55582	0,83019	0,8967

Elaboración: Propia

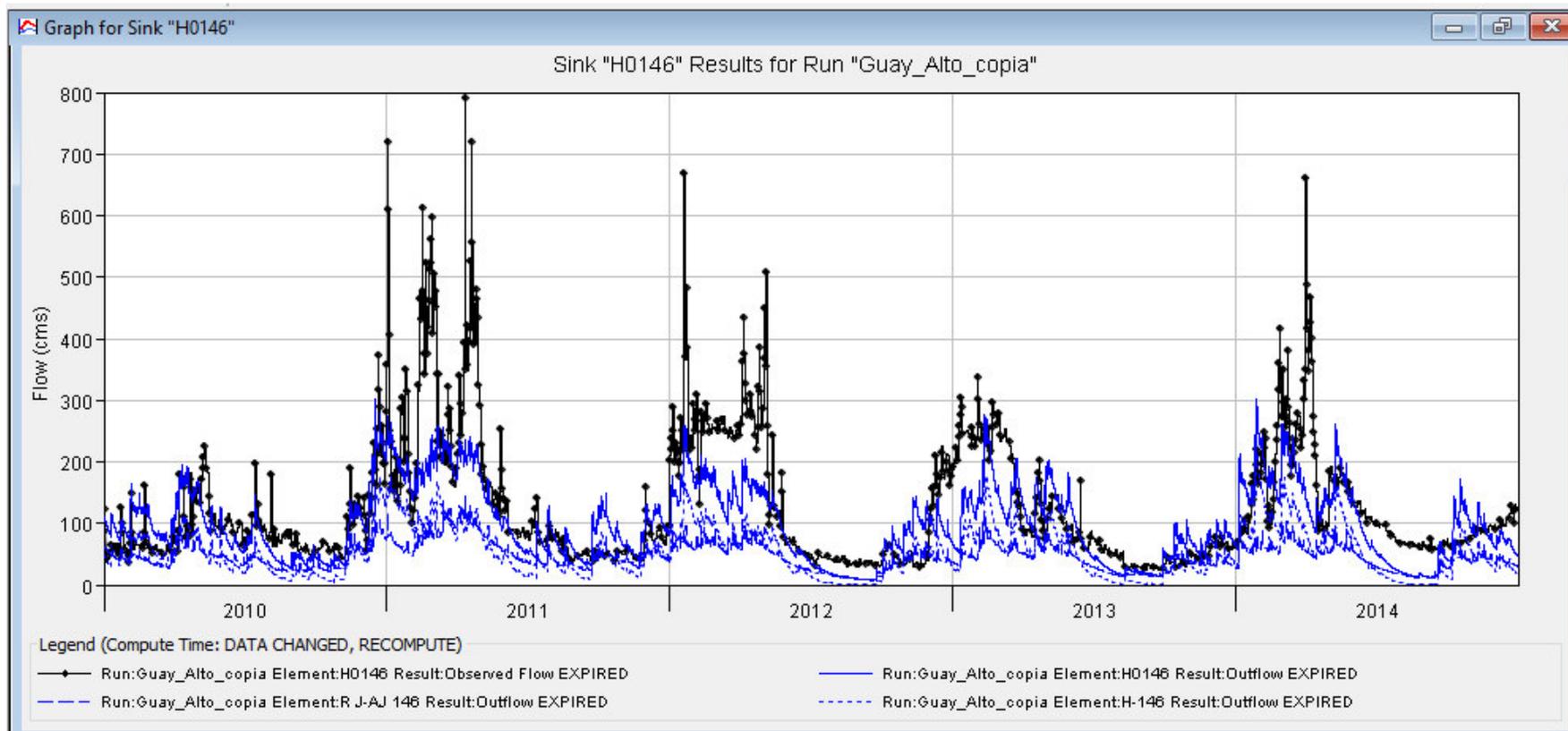


Figura 3.4. Simulación inicial modelo hidrológico HEC-HMS (a)



Figura 3.4. Resultado simulación inicial modelo hidrológico HEC-HMS (b)

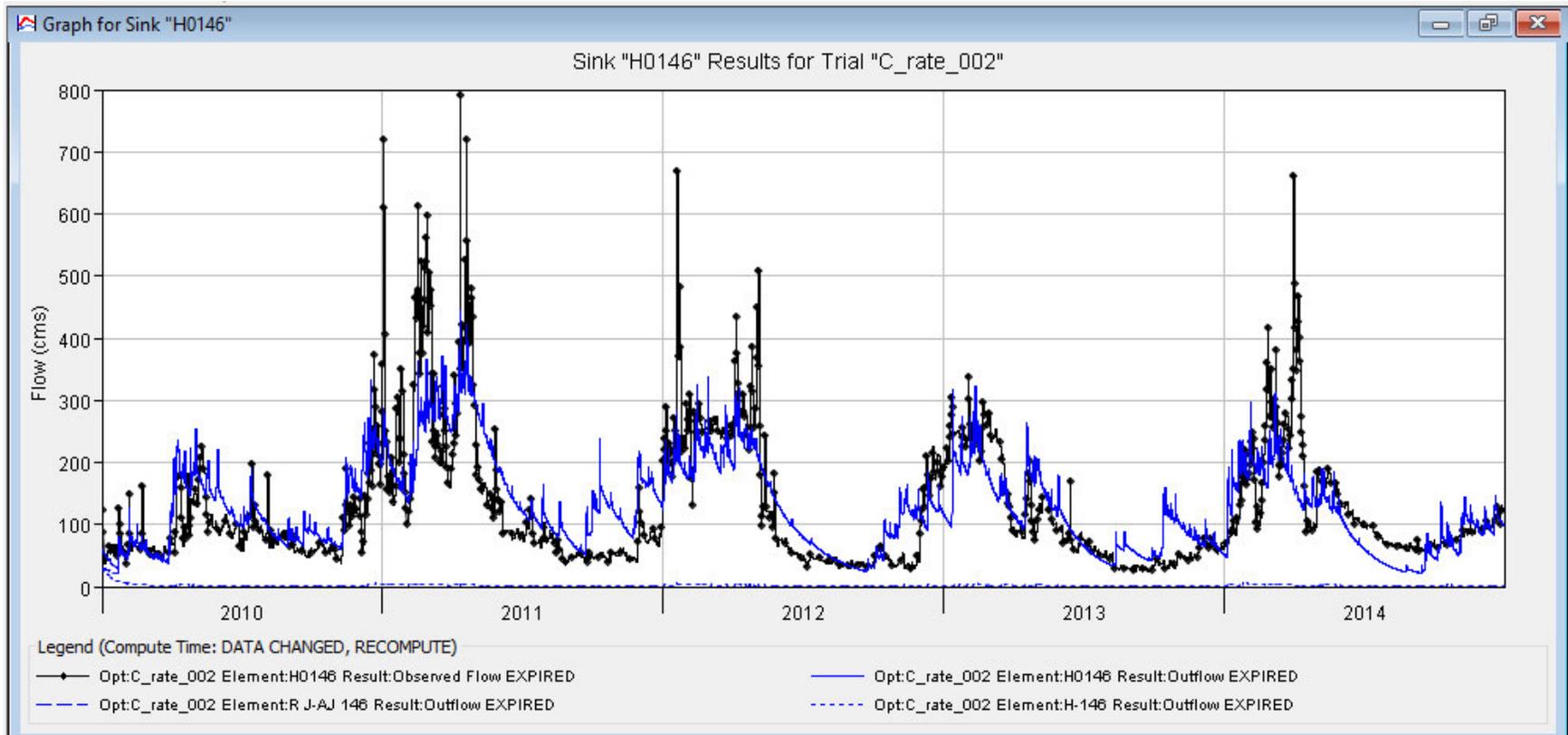


Figura 3.5. Simulación optimizada modelo hidrológico HEC-HMS (a)

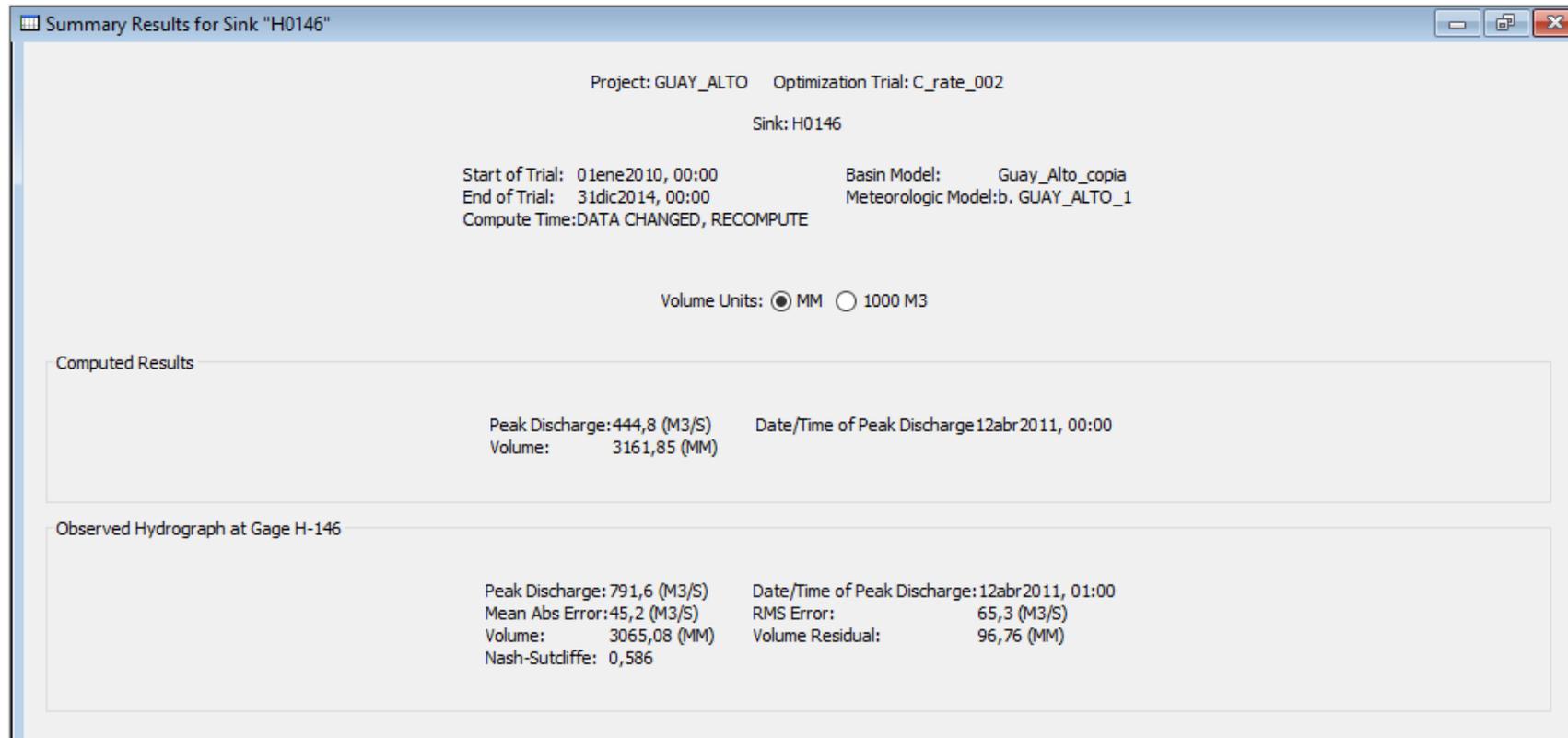


Figura 3.5. Resultado simulación optimizada modelo hidrológico HEC-HMS (b)

Como se muestra en las Figura 3.4. (b) y Figura 3.5. (b) el resultado de calibración automática ascendió el valor de Nash Sutcliffe de 0,428 a 0,586 estableciendo que la calibración del modelo hidrológico es buena y la variabilidad de la serie disminuyo considerablemente. Además, se observa mediante la Figura 3.5. (a) que el caudal simulado y observado a pesar del valor de Nash y tener una tendencia similar no llegan a tener completa similitud, debido a la desigualdad de las subcuencas ya que cada una tiene un comportamiento diferente, además al influir los valores de precipitación, evapotranspiración y su relación con las consideraciones del uso del suelo provocan una notable variación entre caudal observado y simulado.

3.1.3 Resultados de simulación hidrológica HEC-HMS

Una vez establecidas las calibraciones se procedió a la simulación de los modelos hidrológicos en HEC-HMS (Anexo IV) para determinar la disponibilidad de agua en la CARG.

La tendencia de caudal diaria para el año 1982 (Figura 3.6.) sigue la misma tendencia de la precipitación diaria, donde se observa un valor máximo de caudal de 322,62 (m³/s) para el 19 de noviembre considerado mes de invierno y un mínimo de caudal de 26,81 (m³/s) para el 6 de septiembre considerado mes de verano con precipitaciones diarias de 10,89 (mm/mes) y 0,22 (mm/día) respectivamente.

El uso de suelo en 1982 tiene mayor predominancia de vegetación natural (Tabla 3.5.) al estar constituido de páramo determina una mayor retención de agua en el suelo, mayor interceptación, menor impermeabilidad, de igual manera la tasa de infiltración aumenta ocasionando que no se produzca escurrimiento superficial determinando una buena regulación y menor disponibilidad de agua que llega al punto de cierre del río (Tucci, 2009). La tendencia de disminución y aumento del caudal es proporcional a la precipitación, los meses de invierno constituidos de octubre a mayo muestran un incremento de precipitación al igual que los caudales, en los meses de verano constituidos de junio a septiembre se muestra una disminución de precipitación y caudal respectivamente.

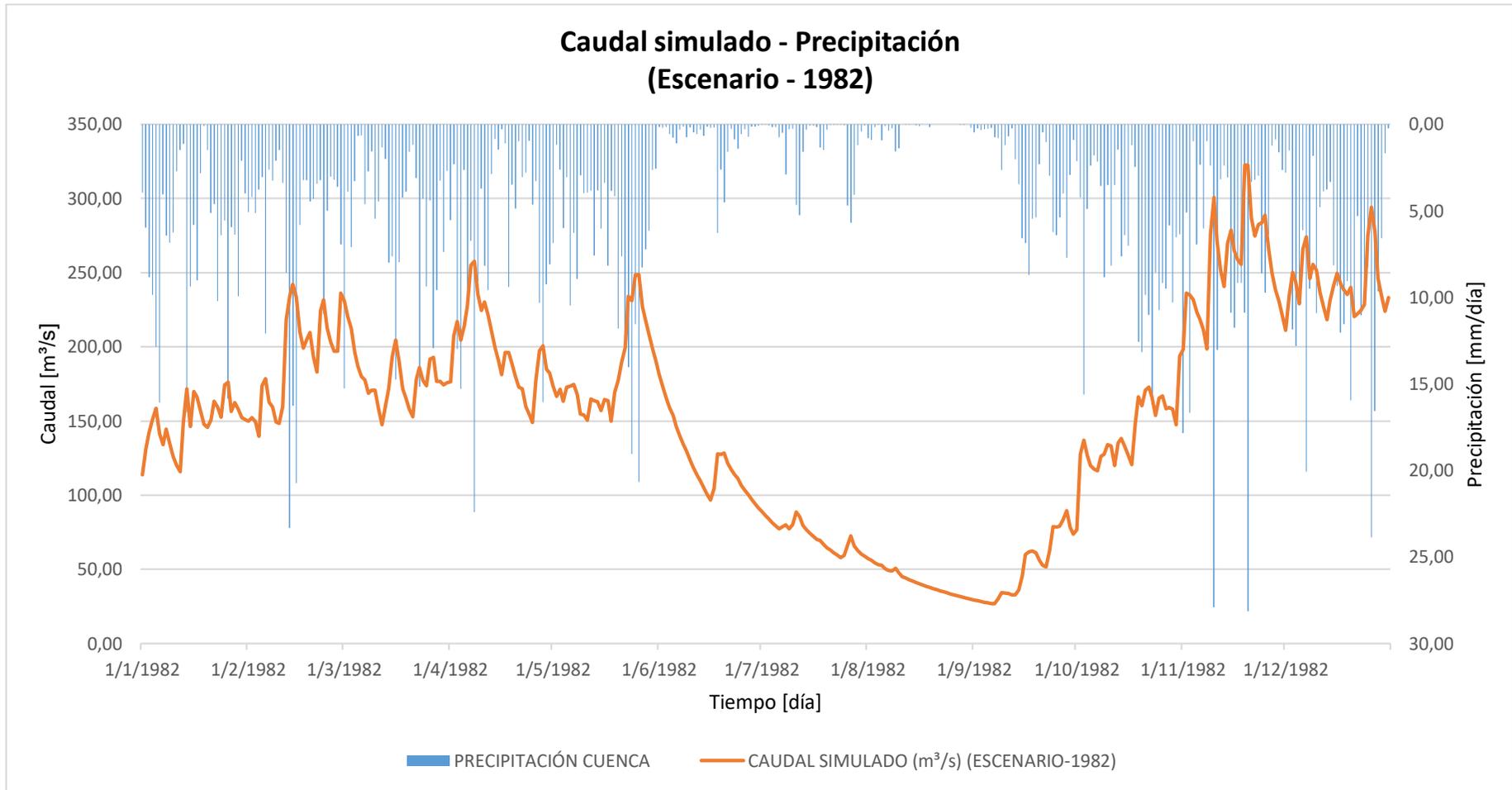


Figura 3.6. Caudal diario y precipitación diaria de la CARG (Escenario 1982)

Elaboración: Propia

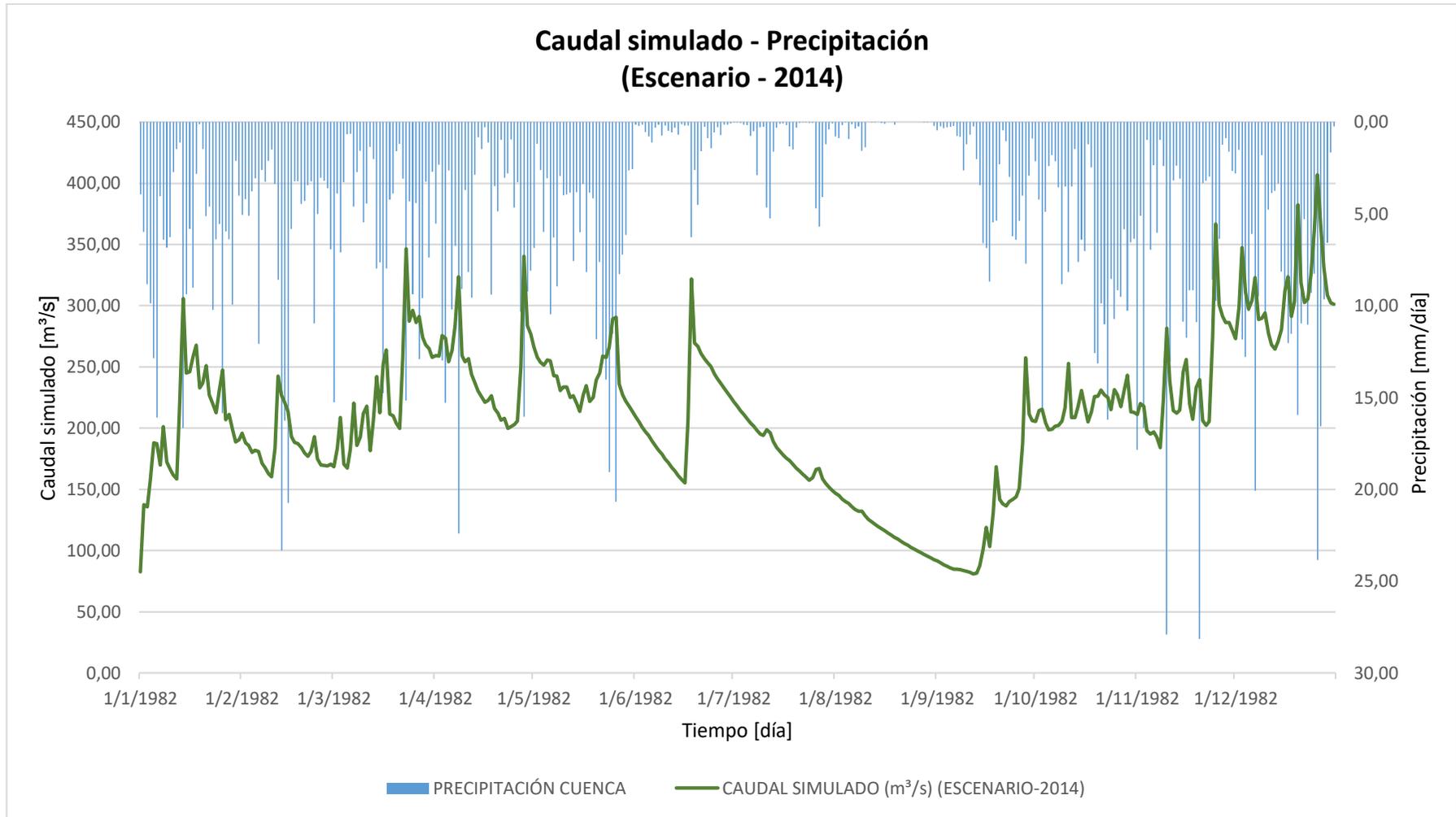


Figura 3.7. Caudal diario y precipitación diaria de la CARG (Escenario 2014)

Elaboración: Propia

La Figura 3.7. muestra la precipitación diaria y el caudal diario para el año 2014, donde se observa un valor máximo de caudal de 407,05 (m³/s) para el 26 de diciembre considerado época de invierno y un valor mínimo de caudal de 80,99 (m³/s) para el 12 de septiembre considerado época de verano con precipitaciones de 23,86 (mm/día) y 0,23 (mm/día) respectivamente.

Para el año 2014 al existir aumento de cultivos de ciclo corto, mosaico de vegetación natural, paisajes minerales, pastos y zona urbana establece menor retención de agua en el suelo, menor intercepción, mayor impermeabilidad, de igual manera la tasa de infiltración disminuye ocasionando que se produzca mayor escurrimiento superficial determinando una mayor disponibilidad de agua que llega al punto de cierre del río generan mayor cantidad de caudal, mediante un estudio similar en los páramos del Nevado de Cayambe se tiene que, para la tierra erosionada, urbano, invernadero y plantación forestal también generan mayor cantidad de caudal (Valencia et al., 2014)

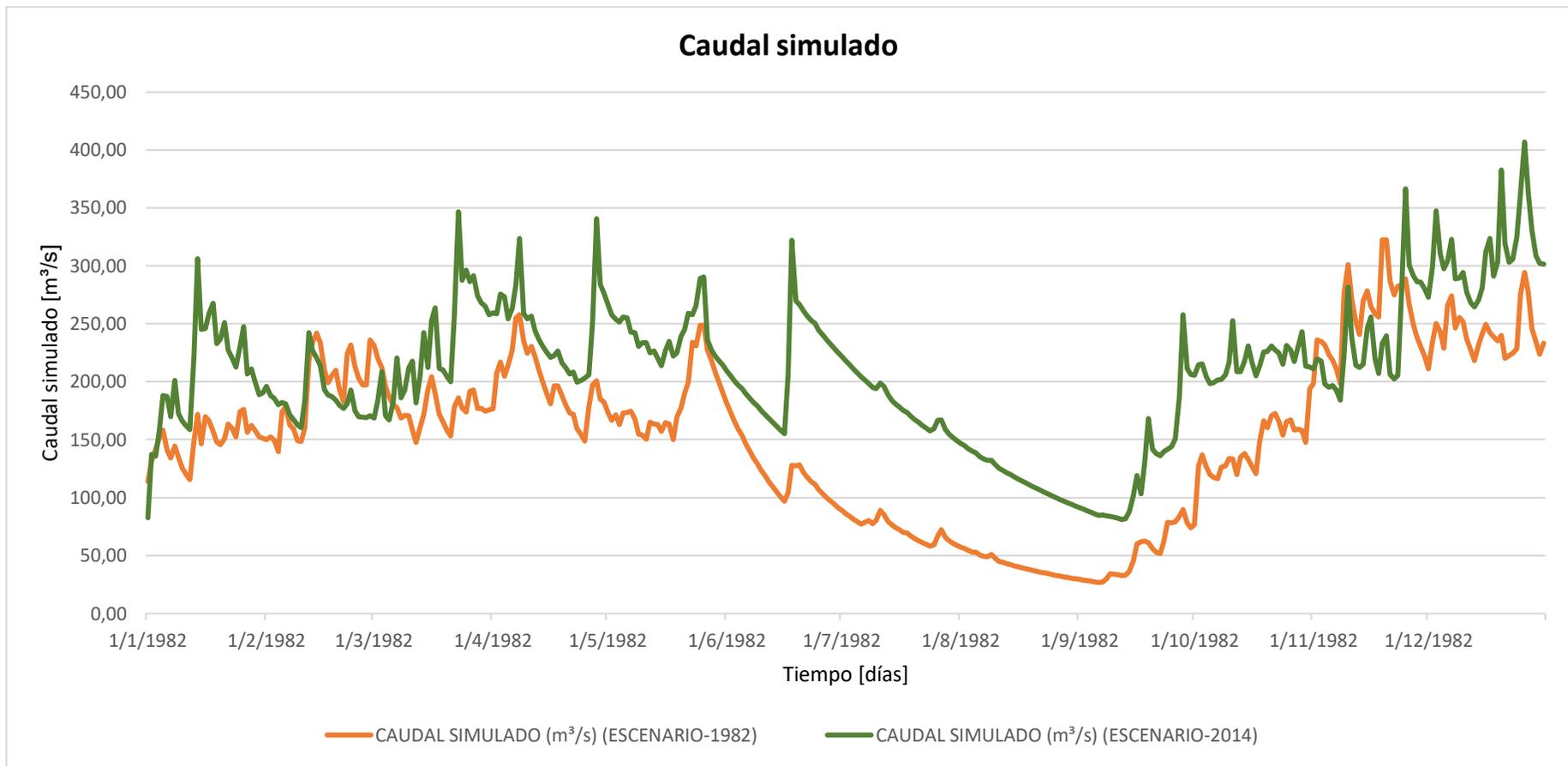


Figura 3.8. Caudales diarios simulados (1982-2014)

Elaboración: Propia

Tabla 3.7. Tasa de cambio caudales medio mensuales simulados

MESES	PRECIPITACIÓN [mm/mes]	CAUDAL SIMULADO [m ³ /s] - 1982	CAUDAL SIMULADO [m ³ /s] - 2014	DIFERENCIA CAUDAL	PORCENTAJE DE CAMBIO ANUAL CAUDAL (%)
Enero	207,75	149,15	203,89	54,74	36,70
Febrero	175,39	191,22	185,69	-5,53	-2,89
Marzo	174,32	180,41	229,79	49,38	27,37
Abril	192,24	198,83	245,78	46,95	23,61
Mayo	221,42	183,58	241,35	57,77	31,47
Junio	26,18	123,19	213,05	89,86	72,94
Julio	36,61	72,52	181,68	109,16	150,52
Agosto	6,94	41,63	117,53	75,90	182,32
Septiembre	86,83	50,12	122,45	72,33	144,31
Octubre	216,68	142,05	217,48	75,43	53,10
Noviembre	229,36	256,31	236,70	-19,61	-7,65
Diciembre	272,83	242,01	310,66	68,65	28,37
TOTAL	1846.53	1831.03	2506.05	675.02	36.86

Elaboración: Propia

Mediante la Figura 3.8. se observa que la variación de la tendencia de caudales tiene un incremento en el año 2014, con un mayor aumento de caudal para el mes de agosto con un porcentaje de aumento de 182.32%, y una disminución de caudal para el mes de febrero y noviembre con porcentajes de -2.89% y -7.65% respectivamente. Esto se puede atribuir a que, en el año 2014 al existir aumento de cultivos de ciclo corto, mosaico de vegetación natural, paisajes minerales, pastos y zona urbana generan mayor cantidad de caudal.

La vegetación natural posee suelos ricos en materia orgánica que tienen la capacidad de almacenamiento de agua en periodos de lluvia y una posterior liberación en épocas secas hacia los cauces de agua. Al ser la vegetación natural el uso de suelo con mayor decrecimiento entre el año 1982 y 2014 con una disminución de área de 906,03 km², su cambio a usos de suelos de cultivos de ciclo corto, pastos y mosaico de vegetación natural agrava el impacto antropogénico provocando elevadas tasas de erosión y reducción en la capacidad de retención de agua alterando las condiciones hidrológicas en la superficie, provocando que las escorrentías en las áreas de la cuenca con mayor decrecimiento de vegetación natural sean mucho más fuertes generando mayor volumen de agua en la estación de cierre (Hofstede et al., 2002; Molina et al., 2015).

Los cultivos de ciclo corto, pastos y mosaico de vegetación natural al ser los siguientes en importancia en aumento de área en la CARG con 108,92 km², 372,48 km², 375,35 km² respectivamente generan un aumento en el caudal provocado por la compactación de

suelos en el caso de pastos originado por una alteración en la relación precipitación, infiltración y escorrentía (Tobón, 2009).

La construcción de vías de comunicación asfaltadas, infraestructuras provoca el aumento de áreas de zonas urbanas en la CARG, producida en su mayoría por el incremento poblacional en la cuenca media, causando que se pierda la capacidad de infiltración y se incrementen los coeficientes de escorrentía del suelo colaborando con el aumento del caudal que llega al río.

En la tabla 3.7. se presenta los valores de caudal simulado para los escenarios de cambio de uso de suelo de los años 1982 y 2014 con los mismos valores de precipitación para los dos escenarios mencionados, obteniendo como resultados un incremento de caudal para el año 2014, tomando en cuenta que para los meses de invierno hay mayor incremento de caudal y los meses de verano hay un decremento de caudal proporcionales a los incrementos y decrementos de precipitación, de esta manera se observa que hay mayor disponibilidad de agua en el cauce del río a causa de los cambios de uso de suelo.

3.2 Conclusiones

El propósito de este proyecto fue determinar la disponibilidad de agua en la CARG mediante la influencia del cambio del suelo a través de la modelación hidrológica para lo cual se encontró lo siguiente:

- Respecto al objetivo general

El modelo hidrológico HEC-HMS permitió simular caudales mediante los múltiples cambios en el uso del suelo entre los escenarios de los años 1982 y 2014, representados por los diferentes métodos que se encuentran dentro del modelo hidrológico como canopy, loss, transform y baseflow, de tal manera que se obtuvo información acerca del aumento o disminución de caudal en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba, a través de los resultados obtenidos en la estación hidrológica H-0146, se estableció que el escenario de uso de suelo con mayor cantidad de caudal se encuentra en el año 2014 con un porcentaje de incremento de 36.86% con referencia al año 1982.

- Respecto al objetivo específico uno

Se establecieron porcentajes de cambios de uso del suelo en la CARG para el año 2014 respecto del año 1982 mostrando un notable cambio de uso del suelo, sobre todo en el incremento de mosaico de vegetación natural (87,29%), pastos (37,52%), zona urbana

(140,45%) y un elevado decremento de vegetación natural (27,52%) que fueron sustituidos en gran parte por cultivos, ocasionando que haya cambios en la infiltración del agua al suelo con una disminución del 12.21% provocando un aumento en la escorrentía superficial representados por los flujos entre 117.53 m³/s y 310.66 m³/s en el punto de cierre de la CARG, todo esto originado en su mayoría por el decremento de vegetación natural ya que este tipo de uso de suelo capta con mayor facilidad la precipitación en épocas de invierno para reservarla y soltarla en épocas secas.

- Respecto al objetivo específico dos

Se generó un modelo hidrológico en HEC-HMS, continuo y semidistribuido que ha sido desarrollado para las etapas de calibración y simulación.

El modelo hidrológico se generó teniendo en cuenta los cambios de uso del suelo, condiciones meteorológicas e hidrológicas para los periodos de tiempo de 1981 – 1985 y 2010 – 2014, con valores de Nash Sutcliffe de 0.428 y 0.586 respectivamente. Permitiendo realizar la simulación con el periodo de precipitación del año 1982.

- Respecto al objetivo específico tres

El cambio de uso del suelo tiene una gran influencia en la disponibilidad del agua, mediante el escenario del año 1982 el promedio de caudal mensual tuvo una variación entre 41.63 m³/s y 256.31 m³/s, para el escenario del año 2014 el promedio de caudal mensual tuvo una variación entre 117.53 m³/s y 310.66 m³/s, además de tener una diferencia de caudal anual de 675.02 m³/s determinando de esta manera que para la misma precipitación el uso del suelo afecta el resultado de los caudales.

3.3 Recomendaciones

A través de varios estudios que establecen la falta del recurso hídrico en cuencas hidrográficas es importante actualizar la información sobre disponibilidad de agua mediante actualización de coberturas y uso de suelos para los años actuales, de igual manera disponer de información hidrológica y meteorológica más robusta para todas las estaciones de la red del INAMHI.

La disponibilidad de agua mediante el cambio de uso del suelo puede ser calculada por otros modelos hidrológicos diferentes al presentado en este estudio, con el fin de comprobar si los resultados obtenidos son los adecuados o presentan inconsistencias.

El estudio al tener grandes cantidades de datos y subcuencas con diferentes características físicas e hidrográficas no permite desarrollar un valor de Nash excelente (>0.8), por lo cual se recomienda realizar una calibración manual exhaustiva.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, K. (2020). El cambio de uso del suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador. *Scielo.Sa.Cr.* https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962020000200068
- Agencia de Regulación y Control del Agua. (2018). *Plan Estratégico Institucional 2018-2021.* <http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/01/Plan-Estratégico-Institucional-2018-2021-Aprobado.pdf>
- Auge, M. (2007). *AGUA FUENTE DE VIDA.* <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/Agua-fuente-de-vida.pdf>
- Blanco y de la Torre, F. (2015). *Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución.* 21–70. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6115629>
- Buytaert, W., & De Bievre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (Tercera, Vol. 1). [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tkUYqd0Aac8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=ciclo+hidrológico+del+agua&ots=HU6Pg4JdAv&sig=BBVFVvFaHMOwnJk_sC2jMvZzIao#v=onepage&q=ciclo hidrológico del agua&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tkUYqd0Aac8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=ciclo+hidrológico+del+agua&ots=HU6Pg4JdAv&sig=BBVFVvFaHMOwnJk_sC2jMvZzIao#v=onepage&q=ciclo+hidrológico+del+agua&f=false)
- Castañeda, Y. (2016). *Modelación del efecto del cambio de uso de suelo en la cuenca del río Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool)* [Universidad Distrital Francisco Jose De Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5089/CastañedaMoralesYeraldine2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cuza-Sorolla, A., Hernández-Aguilar, M. L., & Barrera-Rojas, M. Á. (2021). Aplicación de polígonos Thiessen para la definición y análisis de áreas de influencia del sistema de salud en ciudades costeras del estado de Quintana Roo Application of Thiessen polygons for the definition and analysis of areas of influence of the health. *Quivera*, 49–71.
- De Bièvre, B. (2000). *Fonag: conservación y restauración de las cuencas hidrográficas.*

14.

- Díaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determination of curve number in Betancí subwatershed (Córdoba, Colombia) through remote sensing and GIS. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452–470. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10171>
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. CEPAL.
- Echavarría, F., Serna, A., & Bañueos, R. (2007). Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido Zacatecano: II Cambios en el suelo. *Técnica Pecuaria En México*, 45(2), 177–194.
- Esse, C., Correa, F., Saavedra, R., & Santander, R. (2020). Efecto Del Uso Del Suelo Sobre La Disponibilidad De Agua Y Eficiencia Hídrica En Cuencas Templadas Del Centro-Sur De Chile. *Vinulate* 2020, 21(1), 1. <https://www.uautonoma.cl/pdf/vinulate2020/Carlos-Esse.pdf>
- Estrada, V., & Pacheco, R. (2012). *Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba Hydrological modeling with HEC-HMS in mountainous basins of Cuban eastern region*. XXXIII(1), 94–105.
- FAO. (2015). *Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe*. <https://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- Faustino, J., & Jiménez, F. (2000). *Manejo de cuencas hidrográficas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8431/Manejo_de_cuencas_hidrograficas.pdf?sequence=1
- Feldman, A. (2000). Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual, March*.
- García-Álvarez, D., Camacho, M. T., Paegelow, M., & Francois, J. (2022). *Land Use Cover Datasets and Validation Tools*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr&id=FNh1EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA21&dq=+land+use+cover+datssets+and+validation+tools+dauid+garcia,+maria+teresa+camacho&ots=5p6MT3-k1H&sig=dmd-FmKBXn9FB6pBoDhypjTTA9Y&pli=1#v=onepage&q=land use cover datssets and validati](https://books.google.es/books?hl=es&lr&id=FNh1EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA21&dq=+land+use+cover+datssets+and+validation+tools+dauid+garcia,+maria+teresa+camacho&ots=5p6MT3-k1H&sig=dmd-FmKBXn9FB6pBoDhypjTTA9Y&pli=1#v=onepage&q=land%20use%20cover%20datssets%20and%20validati)
- García, C., Carreón, J., Hernández, J., López, M. M., & Bustos, J. M. (2013). Actitudes,

- consumo de agua y sistema de tarifas del servicio de abastecimiento de agua potable. *Polis (Santiago)*, 12(34), 363–401. <https://doi.org/10.4067/s0718-65682013000100019>
- Gil, M. de los A., Reyes, H., Márquez, L., & Cardona, A. (2014). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. *Investigación y Ciencia*, 22, 67–73. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67435407008.pdf>
- Guarderas, A. ., Smith, F., & Dufrene, M. c. (2022). Land use and land cover change in a tropical mountain landscape of northern Ecuador: altitudinal patterns and driving forces. *PLoS ONE*, 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260191>
- Guerrero, N., Díaz, M., Urdánigo, J. P., Tayhing, C., Guerrero, R., & Yopez, Á. (2018). Soil use and its influence on the water quality of the El Sapanal micro watershed, Ecuador Diversity and abundance of aquatic macroinvertebrates. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*. <http://www.rccb.uh.cu>
- Guerrero, P. (2011, December 2). *Climatología | La guía de Geografía*. <https://geografia.laguia2000.com/climatologia/climatologia>
- Hammerly, R. (2001). *MODELACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON MÉTODOS DE BALANCE DE AGUA*. Universidad Nacional del Litoral.
- Hofstede, R. G. M., Groenendijk, J. P., Coppus, R., Fehse, J. C., & Sevink, J. (2002). Impact of pine plantations on soils and vegetation in the Ecuadorian high Andes. *Mountain Research and Development*, 22(2), 159–167. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2002\)022\[0159:IOPPOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2002)022[0159:IOPPOS]2.0.CO;2)
- INEC. (2010). *País atrevido: la nueva cara sociodemográfica del Ecuador*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Libros/Economia/Nuevacarademograficadeecuador.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuarios meteorológicos 2013*. https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2022). *Información Institucional – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. <https://www.inamhi.gob.ec/informacion-institucional/>
- Jaramillo, D. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO* (Vol. 1). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/147701/70060838.2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Jorquera, E., Weber, J., & Reyna, S. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *1° Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos, October 2014*, 18.
- Lambin, E., & Geist, H. (2008). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* - Google Libros. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=XgVbsIMm8j8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=land+use+and+land+cover&ots=Fd9THGSdsO&sig=U-8JMOd7zrKjGhoCiXX91W8nEdA#v=onepage&q=land use and land cover&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=XgVbsIMm8j8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=land+use+and+land+cover&ots=Fd9THGSdsO&sig=U-8JMOd7zrKjGhoCiXX91W8nEdA#v=onepage&q=land+use+and+land+cover&f=false)
- López, E., Bocco, G., & Mendoza, M. (2001, August). *Predicción del cambio de cobertura y uso de suelo. El caso de la ciudad de Morelia*. <https://www.redalyc.org/pdf/569/56904505.pdf>
- Mas, J.-F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009, February 4). *La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana*. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/La_evaluacion_de_los_cambios_de_cobertura-uso_de_suelo_en_la_Republica_Mexicana.pdf
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2014). *Cobertura y Uso de la Tierra*. <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2016, November 7). *Deforestación y regeneración a nivel provincial del período 2008-2014 del Ecuador continental*. <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>
- Molina, A., Vanacker, V., Brisson, E., Mora, D., & Balthazar, V. (2015). Multidecadal change in streamflow associated with anthropogenic disturbances in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4201–4213. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4201-2015>
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling. *Journal of Hydrology*, 514, 313–327. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.04.014>
- Nené, A., González, G., Mendoza, M., & Silva, F. (2017, March 14). *Cambio De Cobertura Y Uso De Suelo En Cuencas Tropicales Costeras Del Pacífico Central Mexicano | Lector mejorado de Elsevier*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0188461118300062?token=97BE19E0CDEA4DB14ADE3D8FCCC1DF5E9B3DD6F1DE32FE2849160B23CBE7BD8804799BEFAED98EB891AC364D873B076D&originRegion=us-east-1&originCreation=20220711224143>

- ONU. (2022). *Población | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Ordoñez, J. (2011). *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico*. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Ortega, H. (2018). EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN SATELITAL (TMPA-3B42R) SOBRE LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA A ESCALA DIARIA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA. *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL*, 254.
- Pascual, J., & Díaz, M. (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. In *Centro Para El Conocimiento Del Paisaje* (Vol. 1). https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos de Geomática 4_b.pdf
- Pineda, O. (2011, September). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago*. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/41/1/21-2011-Tesis-Pineda Pastrana%2C Oliva-Maestra en Geomática.pdf>
- Serrano, J. (2010). *Regionalización espacial de series climáticas mensuales. Caso estudio Río Guayllabamba*.
- Solis, H., & Cuevas, J. (1995). Modelacion Hidrologica E Hidraulica en la Cuenca Del Rio Caldera - Google Books. In *CATIE* (Primera). https://books.google.com.ec/books?id=MsUOAQAAIAAJ&printsec=frontcover&dq=Modelacion+Hidrologica+E+Hidraulica+en+la+Cuenca+Del+Rio+Caldera&hl=en&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Modelacion Hidrologica E Hidraulica en la Cuenca Del Rio Caldera&f=false
- Tobón, C. (2009). Los bosques andinos y el agua. *PROGRAMA REGIONAL ECOBONA-INTERCOOPERATION Serie Investigación y Sistematización #4*.
- Torres, S. (2018). *Evaluación del servicio ecosistémico correspondiente a la producción de agua en la cuenca alta del Río Guayllabamba utilizando el modelo computacional InVEST*. 111 p. https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=71600&query_desc=kw%2Cwrdl%3A Guayllabamba
- Tucci, C. (2009). Plan De Manejo Integrado De Los Recursos Hídricos. *BID Banco Interamericano de Desarrollo Económico y FONAG Fondo Para La Protección Del*

Agua., <http://www.fonag.org.ec/aguafondo/pmrhg050110.pdf>.
<http://www.fonag.org.ec/aguafondo/pmrhg050110.pdf>

Úbeda, J., & Delgado, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>

UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890/PDF/378890spa.pdf.multi>

Urrutia, R., Lara, A., & Villalba, R. (2005). ¿Cómo ha variado la disponibilidad de agua en la ecorregión de los bosques valdivanos en los últimos siglos? *REVISTA AMBIENTE Y DESARROLLO de CIPMA*, 1–10. [http://www.dendrocronologia.cl/pubs/2005_Urrutia\(Como ha variado la disponibilidad de agua\).pdf](http://www.dendrocronologia.cl/pubs/2005_Urrutia(Como%20ha%20variado%20la%20disponibilidad%20de%20agua).pdf)

Valencia, R., Serrano, D., & Galárraga-Sánchez, R. (2014). Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la disponibilidad de agua. Caso de estudio en los páramos del Nevado Cayambe, Ecuador. *Revista Politécnica*, 34(2), 79. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.22d6506442a5473ab92c82b3fe1c77d5&lang=es&site=eds-live>

Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., & Palacio, Y. J. L. (2002). *Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México*. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906202.pdf>

5 ANEXOS

ANEXO I

1. Coeficientes para cálculo de evapotranspiración, instructivo FAO para cultivos.

Coeficientes del tanque evaporímetro (K_p) para el tanque Clase A para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa (Serie FAO Riego y drenaje No. 24)

Tanque Clase A	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
	HR media	baja < 40	media 40-70	alta > 70	baja < 40	media 40-70	alta > 70	
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	Distancia del cultivo a barlovento (m)			Distancia del barbecho a barlovento (m)				
Baja < 2	1	,55	,65	,75	1	,7	,8	,85
	10	,65	,75	,85	10	,6	,7	,8
	100	,7	,8	,85	100	,55	,65	,75
	1 000	,75	,85	,85	1 000	,5	,6	,7
Moderada 2-5	1	,5	,6	,65	1	,65	,75	,8
	10	,6	,7	,75	10	,55	,65	,7
	100	,65	,75	,8	100	,5	,6	,65
	1 000	,7	,8	,8	1 000	,45	,55	,6
Alta 5-8	1	,45	,5	,6	1	,6	,65	,7
	10	,55	,6	,65	10	,5	,55	,65
	100	,6	,65	,7	100	,45	,5	,6
	1 000	,65	,7	,75	1 000	,4	,45	,55
Muy alta > 8	1	,4	,45	,5	1	,5	,6	,65
	10	,45	,55	,6	10	,45	,5	,55
	100	,5	,6	,65	100	,4	,45	,5
	1 000	,55	,6	,65	1 000	,35	,4	,45

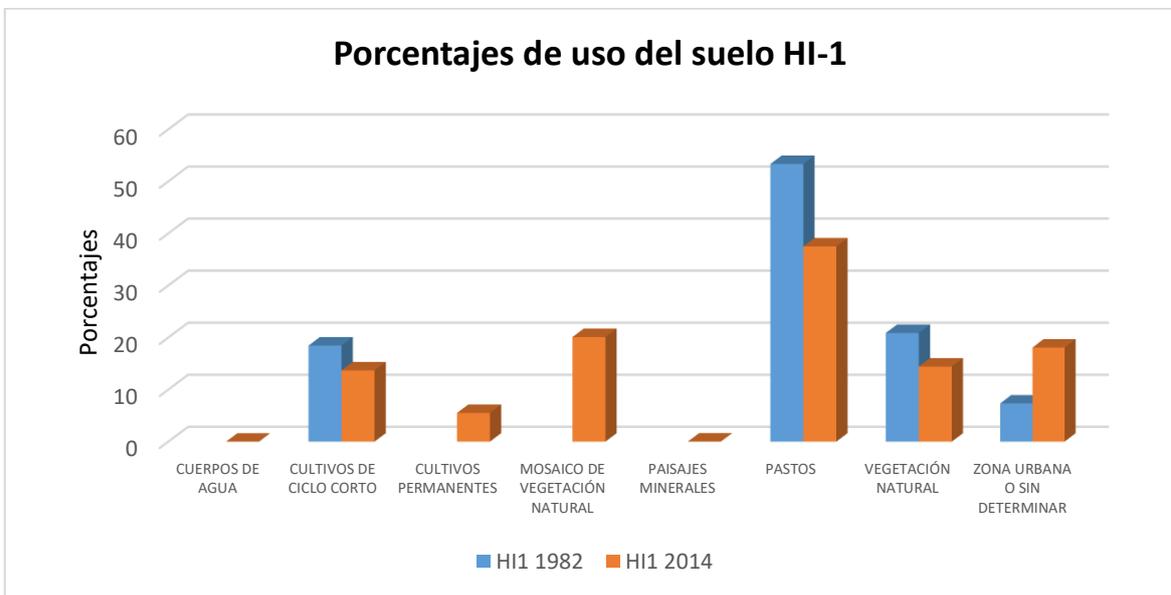
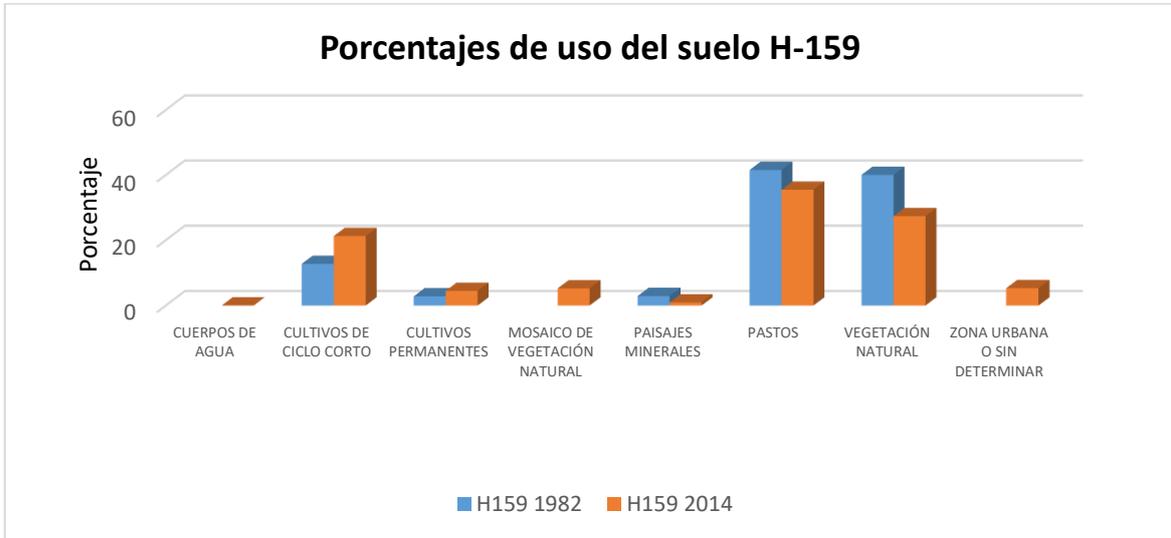
ANEXO II

1. Características agrupación cobertura y uso del suelo

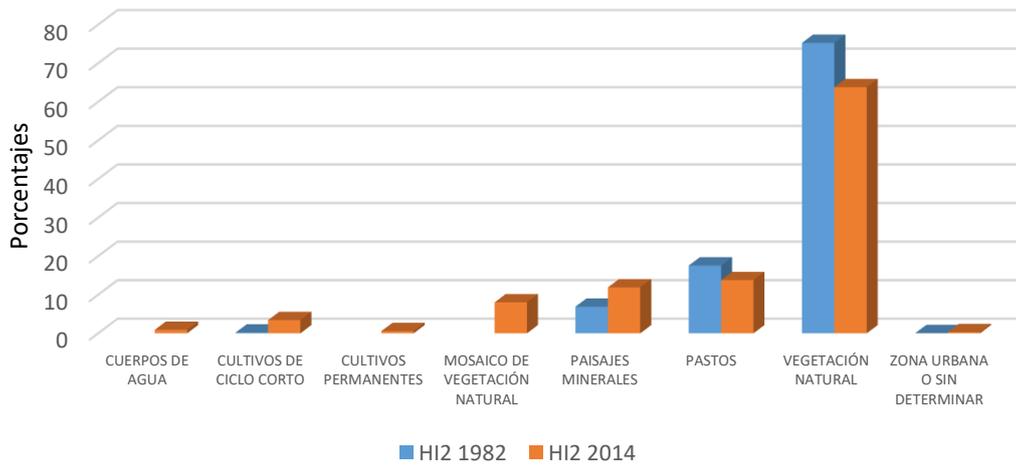
CATEGORIAS DE USO DE SUELO	Clasificación	Características
Cuerpos de agua	Espejos de agua natural	Superficie y volumen de agua en movimiento o estática
	Espejos de agua artificial	Superficie y volumen de agua en movimiento estática producida por actividad antrópica y manejo de recursos hídricos
	Glaciar	Nieve y hielo ubicados en las cumbres de las elevaciones andinas.
Cultivos de ciclo corto	Cultivo anual	Tierras de cultivos agrícolas con cosecha de una o más veces al año.
	Mosaico agropecuario	Agrupaciones de especies asociadas con vegetación natural que se encuentran mezcladas entre sí y no pueden separarse.
Cultivos permanentes	Cultivo permanente	Cultivos agrícolas con ciclos vegetativos mayores a tres años.
	Cultivo semipermanente	Cultivos agrícolas con ciclos vegetativos entre uno y tres años.
	Plantación forestal	Especies forestales establecidas antrópicamente.
Mosaico de vegetación natural	Vegetación arbustiva	Especies leñosas nativas de cierto tamaño con varias ramificaciones desde la base.
	Vegetación herbácea	Especies vegetales que carecen de estructura leñosa, por lo cual no necesitan cuidados especiales.
Paisaje mineral	Área sin cobertura vegetal	Áreas sin vegetación y limitantes edáficas que no son utilizados para agricultura.
Pastizal	Pastizal	Vegetación con predominancia de pastos, leguminosas y poca presencia de árboles y arbustos.
Vegetación natural	Páramo	Ecosistemas de montaña con desarrollo sobre bosques andinos.
	Bosque nativo	Ecosistema arbóreo que conserva inalterables sus propiedades naturales.
Zona urbana o sin determinar	Área poblada	Áreas ocupadas por edificaciones, viviendas y servicios públicos.
	Infraestructura	Conjunto de obras públicas.

ANEXO III

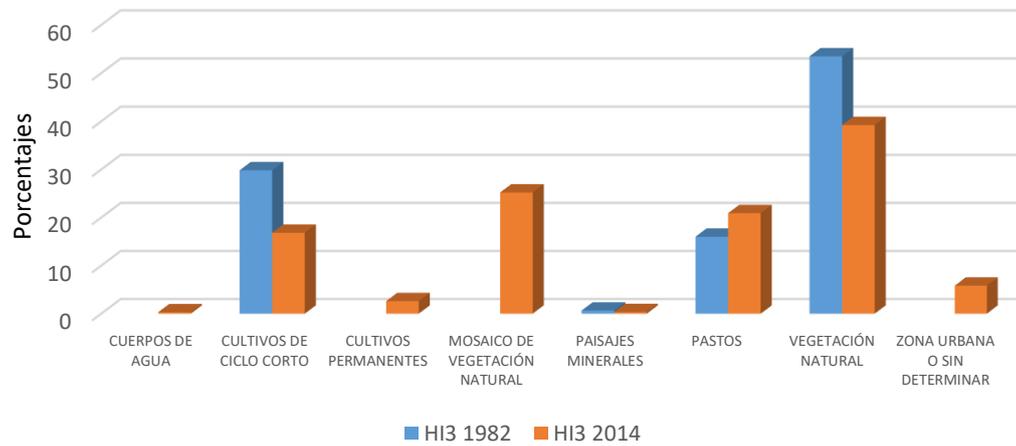
1. Porcentajes de uso de suelo en subcuencas



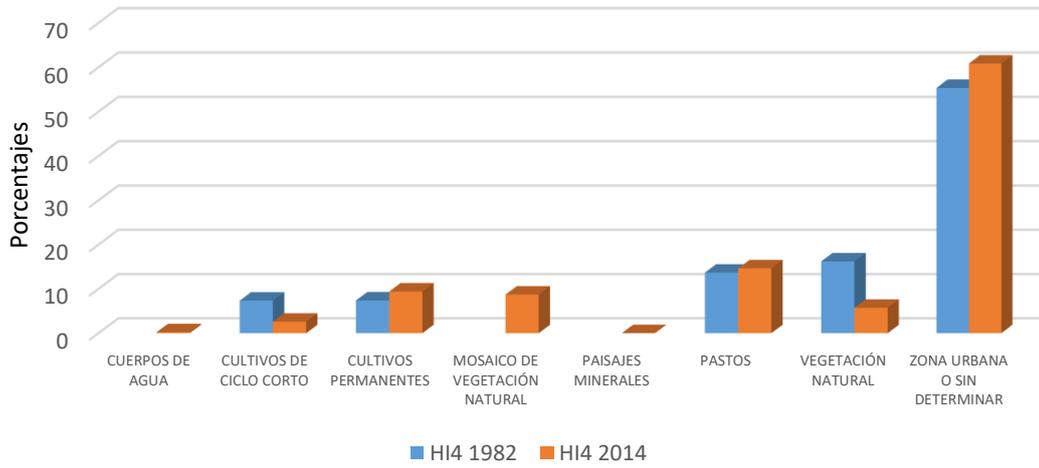
Porcentajes de uso del suelo HI-2



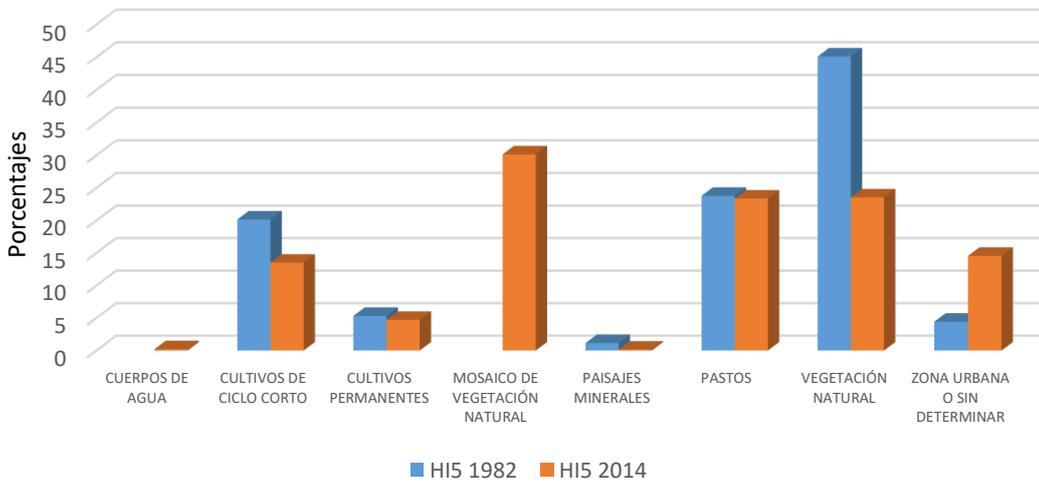
Porcentajes de uso del suelo HI-3



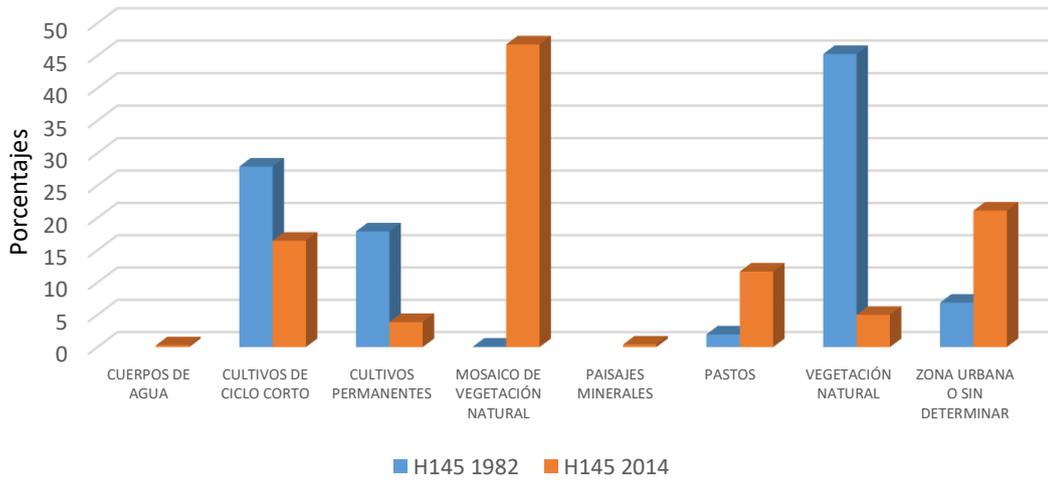
Porcentajes de uso del suelo HI-4



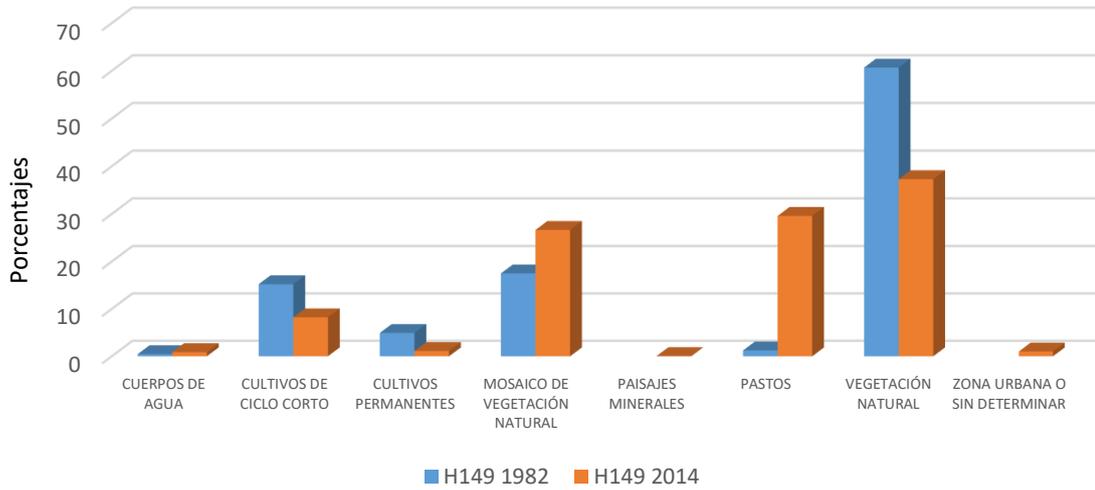
Porcentajes de uso del suelo HI-5



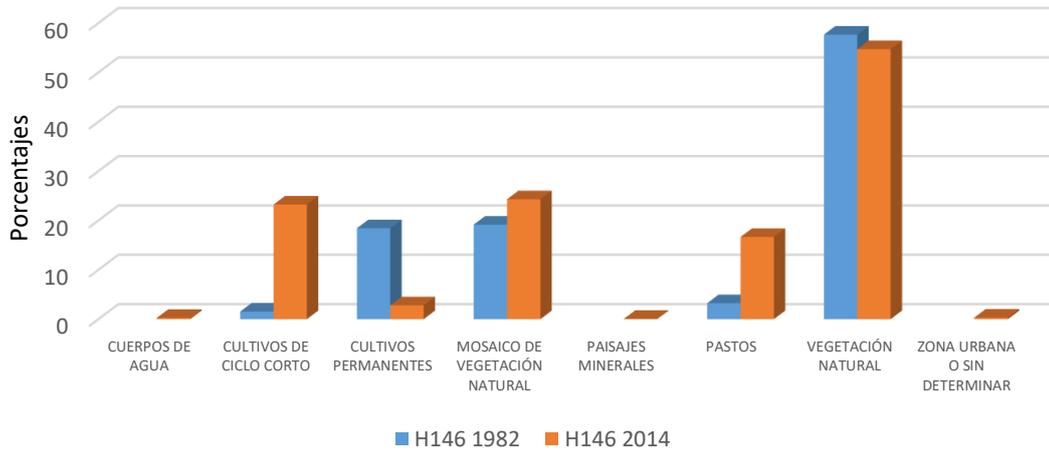
Porcentajes de uso del suelo H-145



Porcentajes de uso del suelo H-149

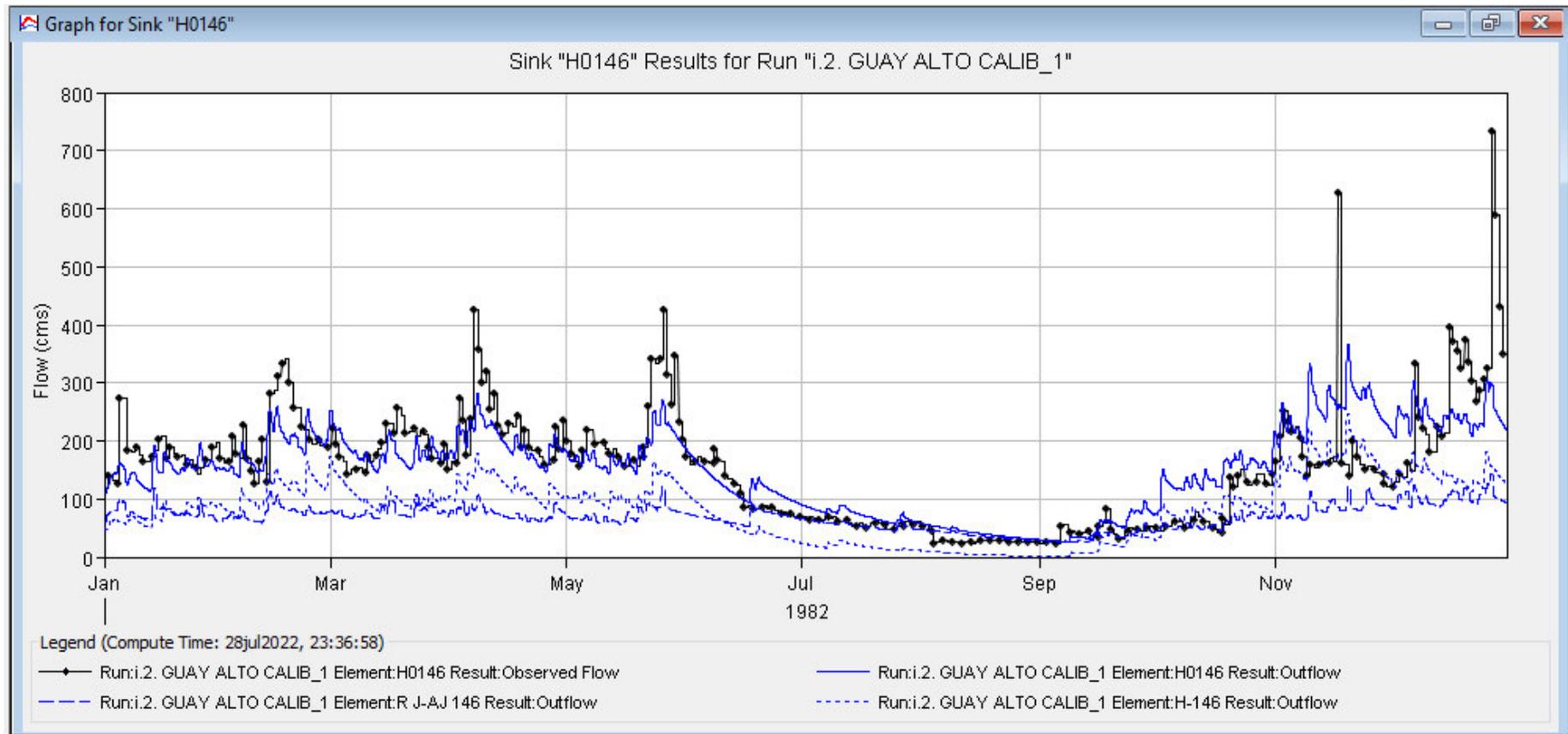


Porcentajes de uso del suelo H-146



ANEXO IV

1. Resultados modelación análisis uso de suelo 1982



2. Resultados modelación análisis uso de suelo 2014

