



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**Evaluación del impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial
mediante HEC-HMS y ArcGIS en la cuenca urbana del río Ambato – tramo sur-oriental
(Avenida Manuelita Sáenz)**

Trabajo de titulación modalidad proyecto técnico, presentado previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil.

AUTOR: Oscar Eduardo Dávila Fuentes

TUTOR: Ing. Bolívar Eduardo Paredes Beltrán, PHD.

Ambato – Ecuador

2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL MEDIANTE HEC-HMS Y ARCGIS EN LA CUENCA URBANA DEL RÍO AMBATO – TRAMO SUR ORIENTAL (AVENIDA MANUELITA SÁENZ)”**, elaborado por el estudiante Oscar Eduardo Dávila Fuentes, portador de la cédula de ciudadanía número 1804060265, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad. Ambato, diciembre 2025

Ambato, enero 2026



.....

Ing. Bolívar Eduardo Paredes Beltrán, PhD.

C.C.: 1804041646

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Oscar Eduardo Dávila Fuentes, con C.C.: 1804060265 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL MEDIANTE HEC-HMS Y ARCGIS EN LA CUENCA URBANA DEL RÍO AMBATO – TRAMO SUR ORIENTAL (AVENIDA MANUELITA SÁENZ)”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, enero 2026



Oscar Eduardo Dávila Fuentes

C.C.: 1804060265

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, enero 2026



Dávila Fuentes Oscar Eduardo

C.C.: 1804060265

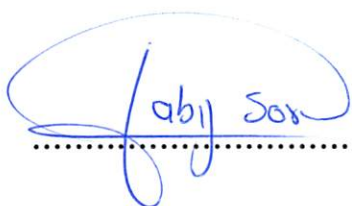
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante Oscar Eduardo Dávila Fuentes, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL MEDIANTE HEC-HMS Y ARCGIS EN LA CUENCA URBANA DEL RÍO AMBATO – TRAMO SUR ORIENTAL (AVENIDA MANUELITA SÁENZ)”**.

Ambato, enero 2026

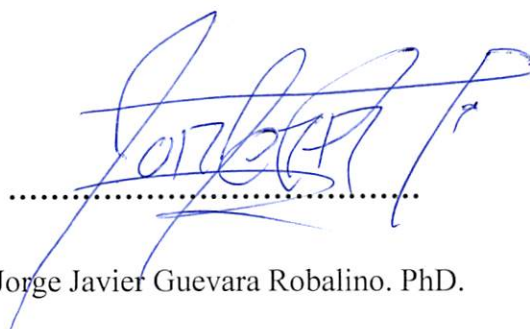
Para constancia firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gaby Soria', is written over a horizontal dotted line.

Ing. María Gabriela Soria Pugo. Mg

C.C.: 1803981214

MIEMBRO CALIFICADOR

A complex handwritten signature in blue ink is written over a horizontal dotted line.

Ing. Jorge Javier Guevara Robalino. PhD.

C.C.: 1803250503

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar mis metas.

A mi mamá, Betty Fuentes, ejemplo de amor, sacrificio y constancia; a mis hermanas, María Isabel Dávila y Valeria Dávila, por su apoyo incondicional y alegría que me impulsan siempre a seguir adelante.

Y a mi padre, Eduardo Dávila, quien desde el cielo ha sido mi inspiración y motivo de orgullo; este logro también es tuyo.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por bendecirme con la salud, la paciencia y la fuerza necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi familia, por ser el pilar que sostuvo mis sueños y me acompañó con amor y fe en cada momento.

A mis tíos, tías, primos, por su aliento constante y sus muestras de cariño.

A mis amigos de la vida, “Los Increíbles”, por cada risa, consejo y momento compartido; y a mis amigos de la universidad, LOS REALES, por ser compañeros de lucha, desvelos y victorias, haciendo de esta etapa una experiencia inolvidable.

A Quality Up, mi lugar de trabajo, por permitirme desarrollar mis habilidades técnicas y profesionales, brindándome oportunidades de aprendizaje y crecimiento personal.

A la Universidad Técnica de Ambato, especialmente a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por la formación académica y humana que me ha permitido convertirme en un profesional comprometido con la sociedad.

A mi tutor de tesis, Ing. Eduardo Paredes, por su dedicación, orientación y paciencia durante el desarrollo de este trabajo, aportando con su experiencia y conocimiento para hacerlo posible.

Y finalmente, al Honorable Gobierno Provincial, por el apoyo brindado en la entrega de datos y la asesoría técnica necesaria, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de esta investigación.

A todos ustedes, con sincero agradecimiento, por ser parte esencial de este logro que representa el fruto de años de esfuerzo, disciplina y sueños cumplidos.

ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	xiv
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
I. JUSTIFICACIÓN	1
II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	3
III. OBJETIVOS	5
A. OBJETIVO GENERAL	5

B.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA		6
I.	EQUIPOS Y MATERIALES	6
II.	MÉTODOS.....	7
A.	FASE 1: DELIMITACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIAL EN ARCGIS.....	7
B.	FASE 2: PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	12
C.	FASE 3: SIMULACIÓN EN HEC - HMS.....	19
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		23
I.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
A.	FASE 1: DELIMITACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIAL EN ARCGIS.....	23
B.	FASE 2: PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	25
C.	FASE III: SIMULACIÓN EN HEC - HMS.....	45
II.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
RESUMEN DE RESULTADOS:.....		60
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		66
I.	CONCLUSIONES	66
II.	II. RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		68
ANEXOS.....		71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Fases del trabajo técnico	6
Fig. 2 Área de estudio.....	8
Fig. 3 Comando Fill.....	8
Fig. 4 Comando Flow Direction.....	9
Fig. 5 Comando Flow Accumulation.	9
Fig. 6 Cauces principales.....	10
Fig. 7 Ubicación del outlet.	10
Fig. 8 Delimitación de la cuenca.	11
Fig. 9 Curvas IDF Aeropuerto Ambato – INAMHI [10].	17
Fig. 10 Delimitación de la microcuenca.....	23
Fig. 11 Mapa de uso y cobertura del suelo año 2014.	24
Fig. 12 Mapa y uso de cobertura del suelo año 2022.	24
Fig. 13 Clasificación hidrológica año 2014.....	26
Fig. 14 Clasificación hidrológica año 2022.....	26
Fig. 15 Tabla de Interpolación de curvas IDF – INAMHI [10].	31
Fig. 16 Hietograma T = 10.	38
Fig. 17 Hietograma T = 25.	41
Fig. 18 Hietograma T = 50.	44
Fig. 19 Estructura del proyecto en HEC - HMS.....	45
Fig. 20 Simulación para 2014.....	46

Fig. 21 Resultados de la subcuenca T=10.	47
Fig. 22 Comportamiento de la subcuenca T=10.....	48
Fig. 23 Resultados de la subcuenca T=25.	48
Fig. 24 Comportamiento de la subcuenca T=25.....	49
Fig. 25 Resultados de la subcuenca T=50.	50
Fig. 26 Comportamiento de la subcuenca T=50.....	51
Fig. 27 Simulación para 2022.....	51
Fig. 28 Resultados de la subcuenca T=10.	52
Fig. 29 Comportamiento de la subcuenca T=10.....	53
Fig. 30 Resultados de la subcuenca T=25.	54
Fig. 31 Comportamiento de la subcuenca T=25.....	55
Fig. 32 Resultados de la subcuenca T=50.	56
Fig. 33 Comportamiento de la subcuenca T=50.....	57
Fig. 34 Caudal de diseño 2014 vs 2022.....	58
Fig. 35 Volumen de lluvia 2014 vs 2022.....	58
Fig. 36 Infiltración en el suelo 2014 vs 2022.	59
Fig. 37 Escorrentía Superficial 2014 vs 2022.....	60
Fig. 38 Relación Causa - Efecto.	62
Fig. 39 Análisis de la subcuenca.	64
Fig. 40 Análisis de la subcuenca.	64

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I EQUIPOS DE CÓMPUTO Y HARDWARE – FASE 1, 2 Y 3	6
TABLA II SOFTWARES ESPECIALIZADOS – FASE 1, 2 Y 3	6
TABLA III MATERIALES CARTOGRÁFICOS Y BASES DE DATOS – FASE 1, 2 Y 3	7
TABLA IV PROPIEDADES DE USO DEL SUELO.....	13
TABLA V NÚMEROS DE CURVAS CN	14
TABLA VI TABLA COMPARATIVA 2014 - 2022.....	25
TABLA VII CN AÑO 2014	27
TABLA VIII CN AÑO 2022.....	28
TABLA IX PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)	32
TABLA X HIETOGRAMA T=10	36
TABLA XI HIETOGRAMA T=25	39
TABLA XII HIETOGRAMA T=50.....	42
TABLA XIII RESUMEN DE RESULTADOS.....	57
TABLA XIV RESUMEN DE INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	59
TABLA XV EFECTO HIDROLÓGICO CUANTIFICADO	62
TABLA XVI DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 MAPA DE UBICACIÓN DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA	71
ANEXO 2 MAPA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA Y SU DRENAJE	73
ANEXO 3 MAPA DE USO DEL SUELO 2014 VS 2022.....	75
ANEXO 4 MAPA DEL TIPO DE SUELO 2014 VS 2022.....	77

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

HEC - HMS	Hydrologic Modeling System
SIG	Sistemas de Información Geográfica
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
CN	Número de Curva
SCS	Soil Conservation Service
HSG	Grupo Hidrológico del Suelo

RESUMEN EJECUTIVO

El crecimiento urbano acelerado en la ciudad de Ambato ha generado importantes modificaciones en el uso y cobertura del suelo, transformando áreas naturales y agrícolas en superficies impermeables vinculadas al desarrollo urbano. Estos cambios alteran el comportamiento hidrológico de las cuencas, incrementando la escorrentía superficial, los caudales pico y el riesgo de inundaciones urbanas. Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial en la cuenca urbana del sector suroriental de Ambato, específicamente en el eje de influencia de la Avenida Manuelita Sáenz, mediante la aplicación de las herramientas de modelación hidrológica HEC-HMS y análisis espacial en ArcGIS.

La metodología se desarrolló a partir de la caracterización del uso del suelo en dos escenarios temporales: año 2014 y año 2022, utilizando información cartográfica provista por entidades oficiales como SIGTIERRAS y el Gobierno Provincial de Tungurahua. Se procesó un Modelo Digital de Elevación de alta resolución para delimitar subcuencas, redes de drenaje y pendientes del terreno. Los parámetros hidrológicos fueron determinados empleando el método del Número de Curva (CN) del SCS-USDA, incorporando tipos de suelo y coberturas registradas en cada escenario. Asimismo, se calcularon los tiempos de concentración utilizando la fórmula de Kirpich. Para el diseño del evento de precipitación se recurrió a las curvas IDF de la estación meteorológica Ambato-Aeropuerto y se generó un hietograma sintético por el método del Bloque Alterno.

Los resultados muestran un incremento en los valores del CN y una disminución en la infiltración, lo que se traduce en mayores volúmenes de escorrentía y caudales pico en el escenario 2022 en comparación con 2014. Este comportamiento evidencia que la expansión urbana ha aumentado la vulnerabilidad hidrológica del sector estudiado. Finalmente, se plantean recomendaciones orientadas a la gestión del riesgo hídrico, considerando la incorporación de infraestructura verde y la planificación territorial sostenible.

PALABRAS CLAVE: ESCORRENTÍA SUPERFICIAL, USO DEL SUELO, CN, HEC-HMS, ARCGIS, HIDROLÓGICO.

ABSTRACT

Rapid urban expansion in the city of Ambato has significantly transformed land use and land cover, converting natural and agricultural areas into impervious surfaces associated with urban development. These alterations affect hydrological responses by increasing surface runoff, peak flow rates, and the likelihood of urban flooding. In this context, the primary objective of this research is to evaluate the impact of land-use change on surface runoff in the urban basin located in the southeastern sector of Ambato, particularly along the influence axis of Manuelita Sáenz Avenue, through hydrological modeling using HEC-HMS and spatial analysis in ArcGIS.

The methodology included characterizing land-use conditions in two temporal scenarios: 2014 and 2022. Official cartographic data from institutions such as SIGTIERRAS and the Provincial Government of Tungurahua were analyzed. A high-resolution Digital Elevation Model was processed to delineate sub-basins, drainage networks, and terrain slopes. Hydrological parameters were determined using the Curve Number (CN) method from the SCS-USDA, considering soil types and land-cover conditions in each scenario. Time of concentration was estimated using the Kirpich formula. Additionally, rainfall design was based on IDF curves from the Ambato-Airport meteorological station, and a synthetic hyetograph was built through the Alternating Block Method.

The results reveal an increase in CN values and a reduction in infiltration in the 2022 scenario, resulting in higher runoff volumes and peak discharges when compared to 2014. These findings demonstrate that urban expansion has intensified hydrological vulnerability in the study area. The research highlights the importance of integrating urban planning with hydrological risk management and suggests implementing sustainable strategies, such as green infrastructure, permeable surfaces, and better control of land-use changes.

KEYWORDS: SURFACE RUNOFF, LAND-USE CHANGE, CN, HEC-HMS, GIS, HYDROLOGICAL.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

I. JUSTIFICACIÓN

El estudio de la microcuenca urbana del tramo suroriental del río Ambato, localizada en la avenida Manuelita Sáenz, se fundamenta en la necesidad de evaluar los efectos del cambio de uso del suelo en la generación de escorrentía superficial. Esta se define como el flujo de agua que no logra infiltrarse en el terreno y se desplaza sobre la superficie, incrementándose significativamente en áreas donde predominan superficies impermeables, como calles, viviendas y aceras [1]. El acelerado proceso de urbanización en este sector ha generado alteraciones significativas en el ciclo hidrológico natural, evidenciadas principalmente por la disminución de la infiltración, el incremento del caudal pico y la sobrecarga de los sistemas de drenaje pluvial. Estas transformaciones modifican el comportamiento hidrológico de la microcuenca y aumentan el riesgo de inundaciones, afectando la sostenibilidad del entorno urbano y evidenciando la necesidad de implementar estrategias de gestión del recurso hídrico basadas en criterios técnicos y científicos. [2].

Para caracterizar estas dinámicas hidrológicas se emplea el método del Número de Curva (Curve Number, CN), desarrollado por el Soil Conservation Service, el cual permite cuantificar la relación entre el uso del suelo, el tipo de suelo y las condiciones de humedad antecedente. En áreas con alto porcentaje de impermeabilización se asignan valores de CN elevados, lo que indica una baja infiltración y un mayor volumen de escorrentía, evidenciando el impacto directo de la urbanización sobre el ciclo hidrológico [3].

La simulación de caudales se apoya en el hidrograma unitario del SCS, modelo que representa la respuesta hidrológica de una cuenca ante una lámina de lluvia efectiva unitaria distribuida uniformemente en tiempo y espacio. Este modelo permite estimar la variación temporal del caudal generado por una tormenta y evaluar el comportamiento del caudal pico, factor determinante en el análisis de riesgo de inundaciones en zonas urbanas [3]. En este contexto, el tiempo de concentración (T_c) adquiere importancia, siendo este el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer la distancia desde el punto más lejano de la cuenca hasta su salida. Un T_c reducido se asocia a cuencas con mayor pendiente e impermeabilización, que responden rápidamente a los eventos de lluvia, incrementando la probabilidad de desbordamientos [4].

Para representar la distribución temporal del evento de lluvia se utiliza el método de bloques alternos, el cual distribuye las intensidades de precipitación colocando el mayor valor en el centro del evento, logrando una representación más realista de la dinámica temporal de las tormentas intensas en ámbitos urbanos [5].

La modelación hidrológica se desarrolla mediante el software HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), herramienta robusta que permite simular la respuesta hidrológica de una cuenca bajo diferentes escenarios de precipitación y cobertura del suelo, por lo que es ampliamente utilizada en el análisis de gestión de escorrentía y drenaje urbano, [6].

Simultáneamente, la caracterización espacial del área de estudio se realiza con apoyo de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) como ArcGIS, las cuales permiten delimitar la cuenca, analizar la pendiente del terreno, identificar variaciones en el uso del suelo y determinar parámetros geomorfológicos con alta precisión. Para ello se emplea información cartográfica oficial generada por [7], [8] y la planificación territorial vigente del GAD Municipalidad de Ambato [9].

A su vez, la información hidrometeorológica necesaria para el análisis de eventos de precipitación proviene de registros del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), entidad oficial responsable del monitoreo climático del Ecuador [10]. Analizar la relación entre urbanización y respuesta hidrológica permitirá cuantificar estos impactos y comprender cómo han cambiado los parámetros hidrológicos con el crecimiento urbano acelerado.

Desde el ámbito teórico, el estudio aportará conocimiento específico para microcuencas urbanas andinas, donde existen vacíos de información y escasas investigaciones enfocadas en la integración de herramientas como HEC-HMS y ArcGIS en la simulación lluvia-escorrentía. En el plano práctico, los resultados servirán como insumo técnico para la planificación urbana y la gestión del riesgo por parte de entidades locales, contribuyendo al diseño de soluciones hidráulicas más eficientes y al desarrollo sostenible de la ciudad de Ambato.

Finalmente, la relevancia del presente estudio se sustenta en las directrices técnicas nacionales que requieren evaluar la capacidad de los sistemas de drenaje urbano y los impactos del crecimiento urbano en la escorrentía superficial, con el fin de garantizar una gestión sostenible del territorio [2], [9]

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En el contexto local, diversos estudios han evidenciado que la ciudad de Ambato atraviesa un proceso acelerado de expansión urbana y transformación del uso del suelo. Carvajal Aldás realizó un análisis multitemporal de la expansión urbana entre 2004 y 2021, identificando un incremento significativo del área construida y la consecuente conversión de suelos rurales a urbanos en la ciudad de Ambato, con especial crecimiento hacia las zonas periféricas del cantón [11]. De manera complementaria, trabajos recientes desarrollados en la región central del país han abordado el cambio de uso de suelo en la ciudad de Ambato y su relación con la planificación del crecimiento urbano, enfatizando la necesidad de integrar criterios de ordenamiento territorial y sostenibilidad en la gestión del espacio urbano [12]. Estos antecedentes sustentan la importancia de estudiar los efectos hidrológicos asociados a la urbanización en esta ciudad.

En cuanto a la dinámica hidrológica local, se han realizado investigaciones orientadas a la identificación de zonas inundables y al análisis de la respuesta lluvia–escorrentía en cuencas y microcuencas vinculadas al cantón Ambato. Mestanza-Orellana desarrolló un análisis hidrológico e hidráulico para determinar áreas de inundación en la zona urbana de Ambato, integrando modelos hidrológicos e hidráulicos (HEC-HMS y HEC-RAS 2D) y proponiendo estrategias de mitigación estructurales y basadas en soluciones verdes [13]. A escala de cuenca aportante al sistema de abastecimiento de la ciudad, Prehn estudió la subcuenca del río Chiquiurcu, ubicada al noroccidente de Ambato, empleando HEC-HMS para la simulación precipitación–escorrentía y la estimación de caudales máximos de crecida para distintos períodos de retorno, a partir de información meteorológica del INAMHI y aforos en campo [14]. En el ámbito urbano inmediato, se han planteado soluciones de tipo correctivo mediante el diseño de atenuadores de escorrentía para la quebrada Cañitas, localizada en Ambato, utilizando HEC-HMS para el análisis lluvia–escorrentía y evaluando alternativas de control de caudales en eventos de diseño [15].

A nivel de cuencas andinas ecuatorianas, la modelación hidrológica con HEC-HMS y su integración con herramientas SIG ha sido ampliamente evaluada. Duque-Sarango et al. analizaron el desempeño del sistema de modelamiento hidrológico HEC-HMS en la microcuenca Chaquilcay, en los Andes del sur del Ecuador, demostrando que el modelo, apoyado en información procesada en ArcMap (uso de suelo, tipo de suelo, modelo digital de elevación y pendiente), reproduce adecuadamente el comportamiento hidrológico en cuencas

de montaña y genera hidrogramas útiles para la gestión de recursos hídricos [16]. En una línea similar, Farinango evaluó la influencia del cambio de uso del suelo en la regulación hídrica de la cuenca del río Guayabal, combinando clasificación supervisada de imágenes Landsat con el cálculo del Número de Curva (CN) y la modelación de caudales en HEC-HMS; sus resultados evidencian variaciones en la escorrentía superficial asociadas a la transición de coberturas, como la reducción del páramo y el incremento de áreas pobladas y agrícolas [17].

Otros trabajos en el país han abordado escenarios de cambio de cobertura y uso del suelo y su impacto en la respuesta hidrológica mediante la integración de teledetección, SIG y HEC-HMS. Maldonado Chávez, en la Universidad Nacional de Chimborazo, desarrolló un estudio hidrológico de cuencas pareadas mediante métodos de teledetección y modelación matemática, utilizando cambios en la cobertura para proyectar respuestas hidrológicas futuras y resaltando la utilidad de HEC-HMS para analizar la sensibilidad de la escorrentía ante modificaciones en el uso del suelo [18]. De forma complementaria, Oñate Paladines aplicó el modelo HEC-HMS en la cuenca del río Zarumilla, simulando caudales bajo distintos escenarios de cambio de uso del suelo, a partir del procesamiento de imágenes satelitales y parámetros morfométricos derivados de SIG, lo que permitió evaluar el efecto de las transformaciones antrópicas sobre la generación de escorrentía [19].

En el contexto andino, Crespo et al. realizaron una compilación de investigaciones en páramos húmedos del sur del Ecuador basadas en microcuencas pareadas, con el objetivo de cuantificar los impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de estos ecosistemas de montaña [20]. Sus resultados muestran que la conversión de coberturas naturales a usos agropecuarios o forestales modifica la capacidad de regulación hídrica de las cuencas, alterando los caudales bajos, medios y pico, y evidenciando una pérdida de la capacidad de amortiguamiento hídrico. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de estudiar la relación entre cambio de uso del suelo y escorrentía en ambientes andinos altamente sensibles, como es el caso de las cuencas y microcuencas que alimentan los sistemas urbanos.

A escala latinoamericana e internacional, Palacios-Cabrera et al. utilizaron el modelo HEC-HMS para evaluar el efecto del cambio de uso de la tierra en el escurrimiento superficial de la cuenca del embalse Guadalest, integrando información de teledetección, SIG y series de precipitación para analizar la evolución espacio-temporal de la respuesta lluvia-escorrentía en distintos escenarios de cobertura [21]. El estudio concluye que HEC-HMS es compatible y eficaz para modelar la escorrentía bajo cambios progresivos del uso del suelo, lo que coincide

con el enfoque planteado en la presente investigación. De manera más general, Ramírez revisa los modelos de escorrentía superficial más empleados en la última década, destacando la amplia difusión de HEC-HMS y HEC-RAS en estudios hidrológicos y de drenaje urbano en América Latina, así como su integración con SIG para el análisis de escenarios de cambio de uso de suelo y gestión del riesgo de inundaciones [22].

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Analizar el impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial en la Cuenca urbana del río Ambato – tramo sur-oriental (Avenida Manuelita Sáenz) mediante el uso de HEC-HMS y herramientas SIG.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Caracterizar el uso y cobertura actual del suelo en el área de estudio mediante la interpretación de imágenes satelitales y análisis espacial con sistemas de información geográfica (SIG).
- 2) Determinar los parámetros hidrológicos necesarios para la simulación en HEC-HMS bajo las condiciones actuales de uso del suelo.
- 3) Simular y obtener los datos de escorrentía superficial para registros históricos (2014) y registros actuales (2022), y realizar una comparación de resultados para analizar los efectos del cambio de uso del suelo en la zona urbana de Ambato.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en tres fases, conforme a los objetivos establecidos en el presente trabajo de titulación. Además, se incorporó un diagrama de flujo que resume la secuencia de trabajo, desde el procesamiento en GIS, la obtención de parámetros hidrológicos, hasta la simulación en HEC-HMS.

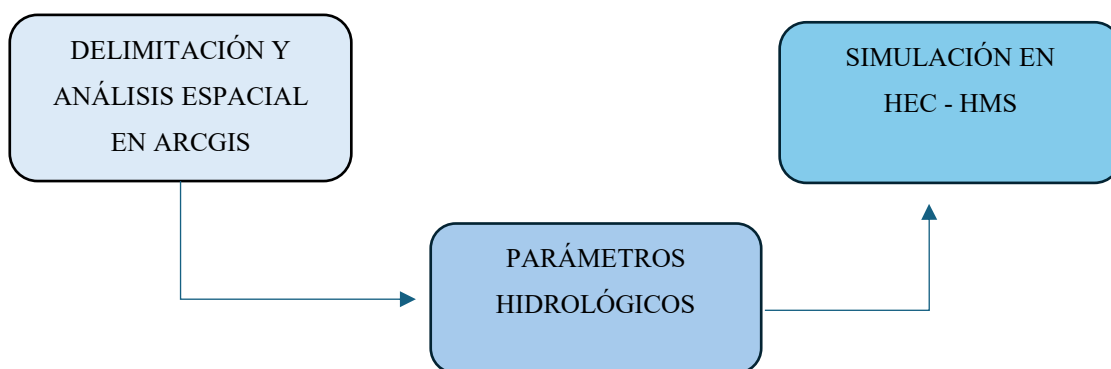


Fig. 1 Fases del trabajo técnico

I. EQUIPOS Y MATERIALES

TABLA I

EQUIPOS DE CÓMPUTO Y HARDWARE - FASE 1,2 Y 3

Equipo y/o Material	Detalle
Computadora de escritorio (laptop)	Modelo: HP Pavilion Gaming Procesador: AMD Ryzen 5 Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce GTX
Mouse de precisión	Marca: HP Sensor: Alta resolución (1200 – 1600 DPI)

TABLA II

SOFTWARES ESPECIALIZADOS - FASE 1,2 Y 3

Equipo y/o Material	Detalle
Google Earth Pro	Versión: 7.3.6.10201
ArcGIS	Versión: 10.8
Excel	Versión: 2510
HEC - HMS	Versión: 4.10

TABLA III
MATERIALES CARTOGRÁFICOS Y BASES DE DATOS - FASE 1,2 Y 3

Equipo y/o Material	Detalle
Modelo digital de elevación	Representación en RASTER de las alturas del terreno.
Cartografía base	Capas geográficas fundamentales para contextualizar el análisis.
Ortofotos o imágenes satelitales	Imágenes georreferenciadas que muestran el territorio real.
Tabla de intensidades (IDF)	Relación entre intensidad de lluvia, duración y frecuencia, usadas para el diseño de drenaje.

II. MÉTODOS

A. FASE 1: DELIMITACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIAL EN ARCGIS

Esta etapa consiste en caracterizar el uso y la cobertura actual del suelo en el área de estudio mediante la interpretación de imágenes satelitales, ortofotos y cartografía temática, empleando herramientas de análisis espacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para ello, se realiza la delimitación precisa de la cuenca hidrográfica utilizando modelos digitales de elevación y procedimientos hidrológicos que permiten identificar la red de drenaje y los límites naturales del escurrimiento [6]. Con esta información se obtiene un mapa actualizado del territorio, fundamental para comprender las condiciones físicas y antrópicas que influyen en la generación de escorrentía superficial.

A continuación, se describe el paso a paso para la obtención del objetivo esperado:

1) Preparación del DEM

- Cargar en ArcGIS Pro o QGIS los modelos digitales del terreno correspondientes al área de estudio.



Fig. 2 Área de estudio.

- Generar un mosaico del DTM con resolución de 3 metros.
- Re proyectar el mosaico al sistema UTM Zona 17 Sur – WGS84.
- Aplicar la herramienta Fill para corregir depresiones e imperfecciones topográficas.

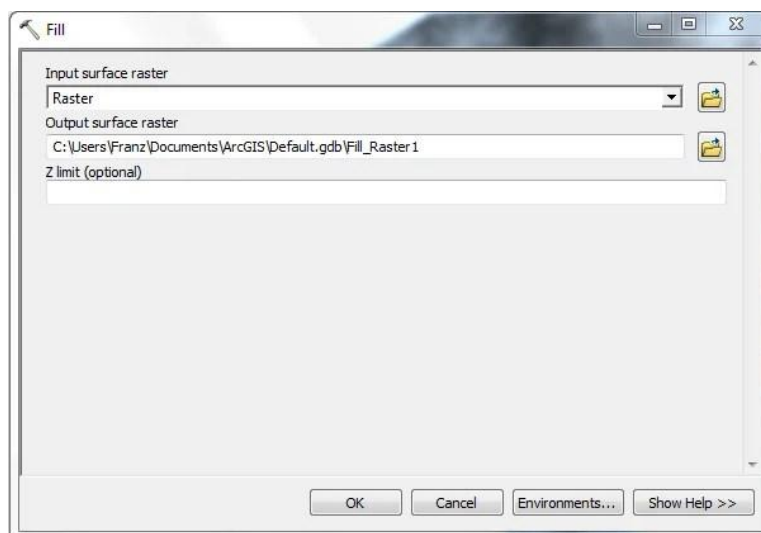


Fig. 3 Comando Fill.

- Obtener como resultado un DEM continuo, corregido y sin hundimientos.

2) *Flujo y dirección de drenaje*

- Ejecutar las herramientas Flow Direction y Flow Accumulation para obtener la dirección y acumulación de flujo en cada celda del DEM.

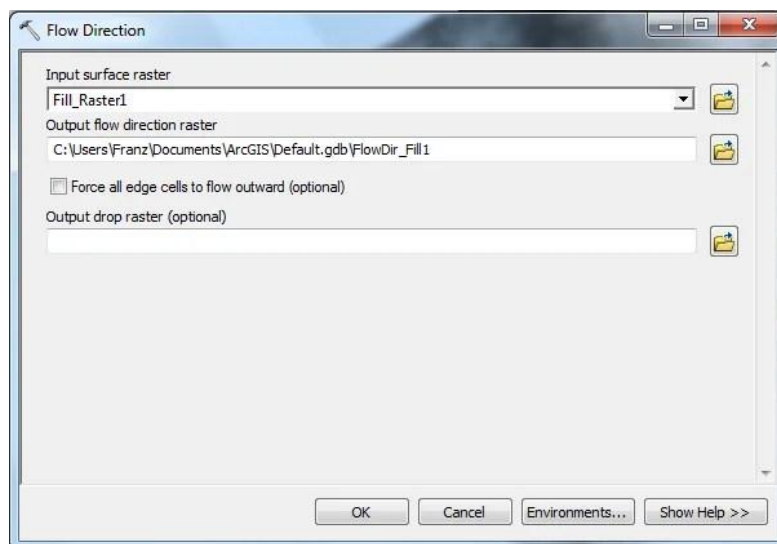


Fig. 4 Comando Flow Direction.

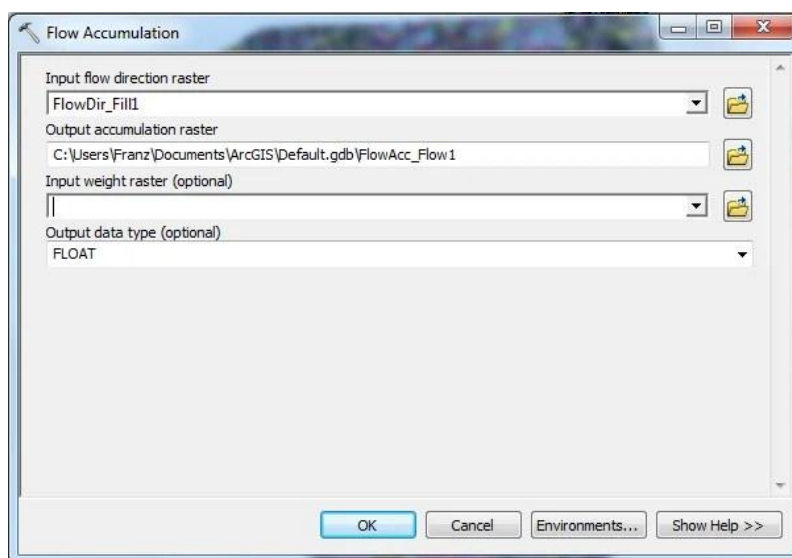


Fig. 5 Comando Flow Accumulation.

- Analizar visualmente el patrón de drenaje para identificar la red natural que converge hacia el punto de salida de la cuenca.

- Aplicar simbología graduada al raster de Flow Accumulation (por ejemplo, gamas de azul) para resaltar los cauces principales.

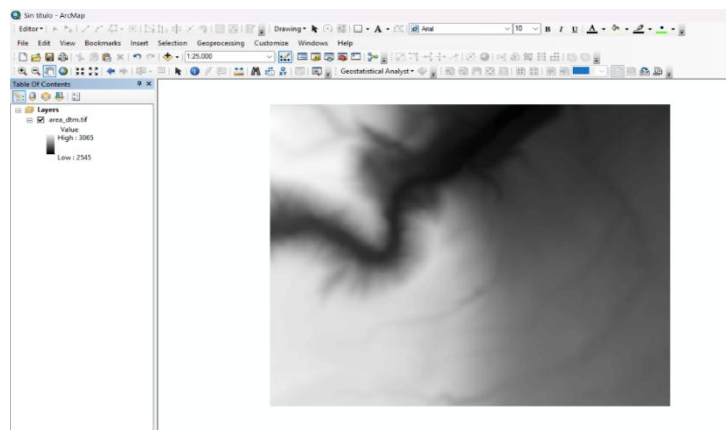


Fig. 6 Cauces principales.

3) Definición del punto de salida (outlet)

- Identificar el punto más bajo de la microcuenca en la Av. Manuelita Saénz, donde converge el flujo superficial.
- Crear un shapefile de punto y marcar la ubicación del outlet

“Para generar automáticamente la red hídrica se utiliza la herramienta Con (condicional), la cual permite clasificar las celdas del raster de acumulación de flujo según un umbral definido por el usuario. Se asigna un valor constante (1) como salida y se emplea una expresión como $value > 50$, cuyo umbral debe ajustarse según el tamaño del píxel y la extensión de la microcuenca: valores bajos muestran afluentes menores, mientras que valores más altos resaltan

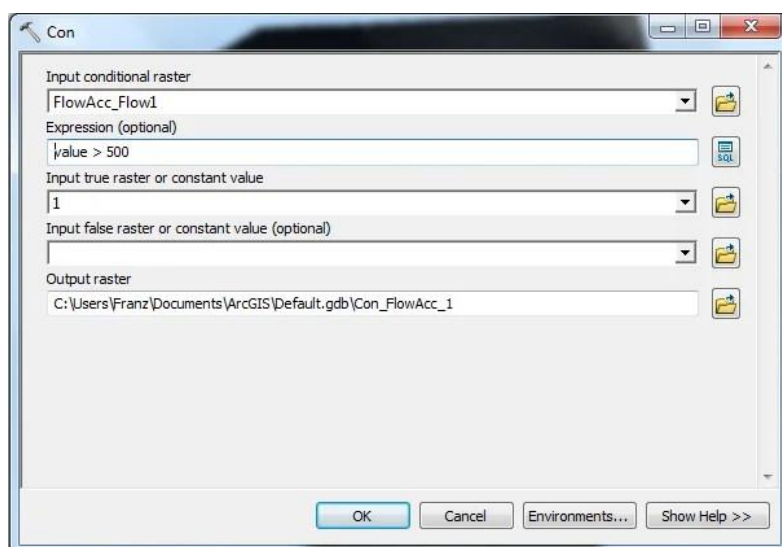


Fig. 7 Ubicación del outlet.

únicamente los cauces principales. Esta operación puede realizarse también mediante Raster Calculator. La ruta de acceso es: *ArcToolbox > Spatial Analyst > Conditional > Con*”

- Guardar el archivo con el nombre outlet_saenz.shp.
- Como referencia, ubicar el punto justo antes de cualquier sumidero o estructura principal de drenaje existente

4) *Delimitación de la cuenca:*

- Utilizar la herramienta Watershed para delimitar la cuenca vertiente.

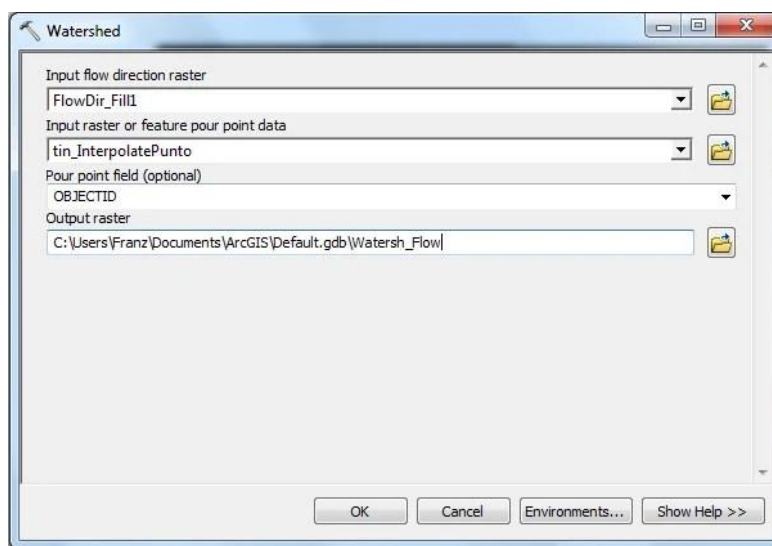


Fig. 8 Delimitación de la cuenca.

- Emplear como insumos el raster de Flow Direction y el punto outlet_saenz.
- Generar el raster resultante de la cuenca y convertirlo a polígono mediante Raster to Polygon.
- Guardar el archivo como microcuenca_saenz.shp.
- Obtener como resultado un polígono cerrado que representa el área total de la microcuenca urbana en estudio.
- Con la herramienta “Calculate Geometry” se calcula el área de la microcuenca en km².

5) *Obtención de la información del uso de suelo en la cuenca de estudio.*

- Se cargaron en ArcGIS Pro/QGIS las capas de uso del suelo de 2014 y 2022 proporcionadas por el Ministerio del Ambiente.
- Se proyectó toda la información al sistema WGS84 mediante la herramienta Project.

- Se recortaron ambas capas al límite de la cuenca hidrográfica utilizando la herramienta Clip.
- Se unificaron y estandarizaron las clases de uso del suelo para garantizar compatibilidad entre los dos años analizados.
- Con la herramienta Dissolve, se agruparon las coberturas en tres categorías principales.
- Se calcularon las superficies en hectáreas de cada categoría mediante Calculate Geometry.

B. FASE 2: PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

En esta fase se realizó el Análisis de cambio de uso del suelo y el cálculo de los parámetros hidrológicos fundamentales para HEC-HMS, los cuales permiten representar el comportamiento del escurrimiento bajo las condiciones actuales del territorio. Para ello, se determina el Número de Curva (CN) que es un índice hidrológico desarrollado por el *Soil Conservation Service (SCS)* que representa la capacidad que tiene un suelo para infiltrar agua y generar escorrentía superficial durante un evento de lluvia [3]. A partir de la combinación entre las categorías de uso del suelo y los grupos hidrológicos del suelo, y se calcula el Tiempo de Concentración (Tc) tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya simultáneamente al caudal de salida empleando parámetros geomorfológicos de la cuenca como pendientes, longitudes de flujo y características del drenaje [4].

Posteriormente, se definieron las lluvias de diseño a partir de las curvas IDF de la estación meteorológica correspondiente y se construyeron los hietogramas de entrada que alimentaron el modelo hidrológico. [5] [10]. Con estos insumos, la cuenca queda preparada para su simulación en HEC-HMS, permitiendo evaluar cómo las variaciones en el uso del suelo influyen en la generación de escorrentía superficial.

1) Matriz de cambio de uso de suelo

A partir de la tabla de propiedades de uso del suelo correspondiente a los años 2014 y 2022, se elaboró en Excel una matriz de cambio que registra las hectáreas asociadas a cada categoría en ambos periodos. Esta matriz también incluye la variación absoluta y porcentual entre los dos años, permitiendo identificar con precisión las transformaciones ocurridas en la cobertura del territorio.

TABLA IV
PROPIEDADES DE USO DEL SUELO

CLASE		2014 (ha)	2022 (ha)	Δ (ha)	Δ (%)

TOTAL					

2) Asignación del grupo hidrológico del suelo:

La asignación del Grupo Hidrológico del Suelo (HSG) se realizó utilizando la capa oficial proporcionada por el HGPT, la cual clasifica los suelos según su textura y capacidad de infiltración [7]. A partir de esta información, se identificó las cuatro categorías definidas por el método SCS: A (arenoso), correspondiente a suelos de alta infiltración; B (franco arenoso), con infiltración moderada; C (franco arcilloso), de permeabilidad reducida; y D (arcilloso), caracterizado por una infiltración muy baja. Esta clasificación fue fundamental para calcular el Número de Curva (CN) y representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la microcuenca en el modelo HEC-HMS.

La asignación del Número de Curva (CN) para cada tipo de suelo se realizó combinando las categorías de uso y cobertura del suelo con el Grupo Hidrológico del Suelo (HSG) previamente identificado, siguiendo los valores establecidos en el cuadro oficial del método SCS [3].

TABLA V
NÚMEROS DE CURVA CN [3]

TIPO DE VEGETACIÓN	LABOREO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	desnudo		77	86	91	94
	CR	pobre	76	85	90	93
	CR	buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	R	pobre	72	81	88	91
	R	buena	67	78	85	89
	R + CR	pobre	71	80	87	90
	R + CR	buena	64	75	82	85
	C	pobre	70	79	84	88
	C	buena	65	75	82	86
	C + CR	pobre	69	78	83	87
	C + CR	buena	64	74	81	85
	C + T	pobre	66	74	80	82
	C + T	buena	62	71	78	81
	C + T + CR	pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	buena	61	70	77	80
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	R	pobre	65	76	84	88
	R	buena	63	75	83	87
	R + CR	pobre	64	75	83	86
	R + CR	buena	60	72	80	84
	C	pobre	63	74	82	85
	C	buena	61	73	81	84
	C + CR	pobre	62	73	81	84
	C + CR	buena	60	72	80	83
	C + T	pobre	61	72	79	82
	C + T	buena	59	70	78	81
	C + T + CR	pobre	60	71	78	81
	C + T + CR	buena	58	69	77	80
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	R	pobre	66	77	85	89
	R	buena	58	72	81	85
	C	pobre	64	75	83	85
	C	buena	55	69	78	83
	C + T	pobre	63	76	80	83
	C + T	buena	51	67	76	80
Pastizales o pastos naturales		pobres	68	79	86	89
		regulares	49	69	79	84
		buenas	39	61	74	80
Pastizales	C	pobres	47	67	81	88
	C	regulares	25	59	75	83
	C	buenas	6	35	70	79
Prados permanentes			30	58	71	78
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante		pobres	48	67	77	83
		regulares	35	56	70	77
		buenas	30	48	65	73

Este cuadro proporciona los valores de CN para cada combinación entre uso del suelo y grupo hidrológico (A, B, C y D), permitiendo determinar el potencial de infiltración y generación de escorrentía para cada unidad espacial de la microcuenca. Con esta referencia normativa, cada clase de uso del suelo recibirá un CN específico que representa su comportamiento hidrológico bajo condiciones de humedad tipo II.

Se elaboró una tabla que contenga los valores de Número de Curva (CN) para cada tipo de suelo en los años 2014 y 2022, utilizando la información de uso del suelo y los grupos hidrológicos identificados. Los CN se asignaron según el cuadro oficial del método SCS, permitiendo comparar el comportamiento hidrológico de la cuenca entre ambos periodos.

3) *CN ponderado (CN*)*

Se calculará el CN en función del área para cada año en base a la siguiente fórmula:

$$CN^* = \frac{\sum(CN_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (1)$$

Donde,

CN_i Número de Curva asignado a cada tipo de uso o cobertura del suelo.

A_i Área (en hectáreas o metros cuadrados) asociada a ese uso del suelo.

PRODUCTOS ESPERADOS DE LA FASE:

Con el cálculo de CN en función del área para cada año se realizaron los siguientes mapas:

Mapa CN_2014 y Mapa CN_2022 (raster o polígonos) con sus valores de CN*2014 y CN*2022

Los cuales están disponibles en la sección ANEXOS

4) *Tiempo de concentración (Tc)*

Método de Kirpich para cálculo de tiempo de concentración:

$$T_c [\text{min}] = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.385} \quad (2)$$

Donde,

L longitud hidráulica medida a lo largo de ese trayecto.

S pendiente promedio, calculada como la diferencia de elevación dividida para la longitud hidráulica

Se eligió el método de **Kirpich** debido a que fue desarrollado específicamente para estimar el tiempo de concentración en **microcuencas pequeñas con pendientes pronunciadas**, características que se ajustan a las condiciones del área de estudio. A diferencia de otros métodos como **Kerby–Hathaway**, que es más apropiado para flujos laminares en superficies con baja pendiente y cobertura vegetal densa, o **Bransby–Williams**, recomendado para cuencas de mayor extensión, el método de Kirpich proporciona resultados más representativos en escenarios donde predominan trayectorias de flujo cortas, pendientes marcadas y respuesta hidrológica rápida, típicas de zonas urbanizadas. [1] Por esta razón, se consideró el procedimiento más adecuado para la presente investigación

Se mantuvo un tiempo de concentración (T_c) constante con el fin de que el Número de Curva (CN) sea la principal variable de análisis, considerando que la topografía del área de estudio no

presenta cambios significativos [3]. Esta decisión se adopta como una aproximación conservadora para evaluar únicamente el efecto del cambio de uso del suelo.

Medición de L y S

Se identificó la ruta de flujo principal del terreno desde la cota más elevada hasta el punto de salida utilizando el DEM y las herramientas de acumulación de flujo.

Posterior al cálculo de T_c se calculó $0.6T_c$ dato que sirvió más adelante en el modelado de HEC-HMS

5) Validaciones y buenas prácticas

Coherencia física esperada:

- Si 2022 aumenta la superficie urbanizada, el CN ponderado tiende a incrementarse, las pendientes efectivas disminuyen, la infiltración inicial se reduce y, en consecuencia, la escorrentía generada es mayor.
- El tiempo de concentración generalmente se acorta en escenarios con mayor impermeabilización y presencia de obras de canalización, lo que produce una respuesta hidrológica más rápida.

6) Lluvia de diseño y hietogramas para HEC-HMS

Se definieron las lluvias de diseño para periodos de retorno de $T = 10, 25$ y 50 años para construir los hietogramas (series de lluvia vs tiempo) que se usarán en el HEC-HMS para ambos escenarios (2014-2022). La lluvia será idéntica en ambos escenarios para aislar el efecto del cambio del uso del suelo.

a) Decisiones previas para el cálculo del HIETOGRAMA

De acuerdo con [6] se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para la duración de la tormenta:

- Si $1.5 T_c \leq 3 \text{ h} \rightarrow \mathbf{D = 3-6 \text{ h.}}$
- Si $1.5 T_c \in [3,6] \text{ h} \rightarrow \mathbf{D = 6 \text{ h.}}$
- Si $1.5 T_c > 6 \text{ h} \rightarrow \mathbf{D = 12 \text{ h.}}$

b) Determinación de valores en las curvas IDF

De acuerdo con la estación meteorológica seleccionada para el estudio en este caso, AEROPUERTO AMBATO, por ser la más próxima al área de análisis se revisarán los datos de las curvas IDF disponibles en el registro del INAMHI [10].

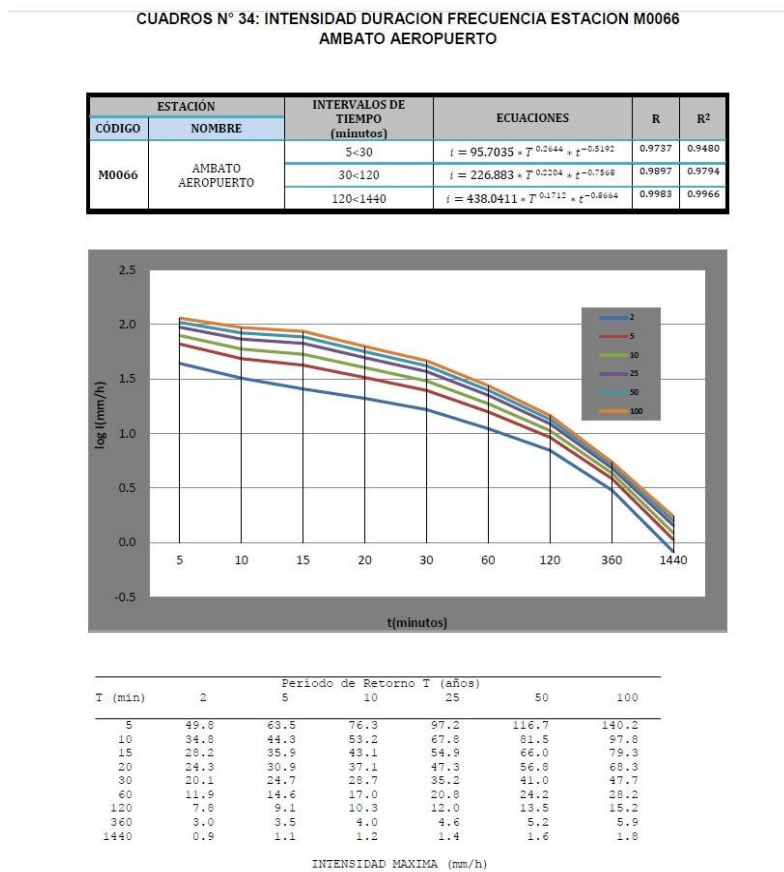


Fig. 9 Curvas IDF Aeropuerto Ambato – INAMHI [10].

A partir de esta información y mediante una interpolación logarítmica, se estimaron los valores faltantes correspondientes a los intervalos de tiempo previamente definidos para la elaboración del hietograma.

Este método asume que la relación entre **intensidad (I)** y **duración (t)** sigue una tendencia logarítmica, típica de las curvas IDF.

Dado un intervalo intermedio *t* entre dos duraciones conocidas t_1 y t_2 :

$$I(t) = I_1 + \left(\frac{\log(t) - \log(t_1)}{\log(t_2) - \log(t_1)} \right) (I_2 - I_1) \quad (3)$$

Donde,

I_1 intensidad asociada a la duración t_1

I_2 intensidad asociada a la duración t_2

t duración intermedia donde se desea obtener la intensidad

Todos los logaritmos pueden ser base 10 o natural (pero deben ser consistentes)

Procedimiento resumido:

- Seleccionar dos duraciones t_1 y t_2 entre las cuales se encuentra el tiempo objetivo t .
- Transformar las duraciones a $\log(t_1)$, $\log(t_2)$ y $\log(t)$.
- Aplicar la fórmula de interpolación logarítmica.
- Repetir el proceso para todos los intervalos necesarios (ej.: 5, 10, 15, 20 min, etc.).

7) Construcción del hietograma por el método de bloques alternos

Los hietogramas de diseño se generaron mediante el Método de Bloques Alternos (Alternating Block Method), el cual distribuye la lluvia obtenida de las curvas IDF en una serie temporal organizada alrededor del máximo bloque de intensidad, con el fin de representar la variación temporal típica de una tormenta convectiva. [5]

a) Definición de parámetros iniciales

- Se establecieron los periodos de retorno a analizar.
- Se definió la duración total de la tormenta de diseño.
- Se seleccionó el intervalo de tiempo Δt para discretizar la precipitación.

b) Obtención de intensidades desde las curvas IDF

- Se recopilaron las intensidades correspondientes a cada duración.
- Cuando faltaron valores para ciertas duraciones, se estimaron mediante interpolación logarítmica.

c) Conversión de intensidades en alturas de lluvia

- Cada intensidad se transformó en profundidad acumulada de precipitación mediante:

$$h = i \cdot \Delta t \quad (4)$$

Donde,

h altura de precipitación..

i intensidad de lluvia.

Δt intervalo de tiempo

- Se generaron así una lista de bloques de lluvia para toda la duración del evento.

d) Ordenamiento de los bloques de precipitación

- Las alturas obtenidas se organizaron en orden descendente, identificando el valor máximo.
- Se generaron de la resta del de las profundidades acumuladas seguidas.
- Esta lista fu la base para construir el hietograma.

e) Aplicación del Método de Bloques Alternos

- Se ubicaron el bloque de mayor altura dentro del 30% al 50% del hietograma.
- Los bloques restantes se colocaron alternadamente hacia abajo y hacia arriba, siguiendo el orden decreciente.
- Se completó así la distribución temporal de la tormenta.

f) Construcción del hietograma final

- Se generó la serie lluvia–tiempo del evento de diseño.
- Se elaboró el gráfico del hietograma para cada periodo de retorno.

g) Incorporación al modelo hidrológico

- Los hietogramas resultantes se cargaron en HEC-HMS como lluvia de entrada.
- Se emplearon para simular la respuesta hidrológica de la cuenca bajo los distintos escenarios evaluados.

C. FASE 3: SIMULACIÓN EN HEC - HMS

En esta fase se obtuvo la respuesta hidrológica de la cuenca para los escenarios correspondientes a los años 2014 y 2022, a partir de las simulaciones realizadas en HEC-HMS [6]. Los resultados permitieron identificar las variaciones en la escorrentía superficial asociadas al cambio de uso del suelo en la zona urbana de Ambato. Asimismo, se prevé comparar parámetros clave como el caudal pico, el tiempo al pico, el volumen de escorrentía y la forma

del hidrograma, con el fin de evaluar si el proceso de urbanización ha generado un incremento en la respuesta rápida de la cuenca. Esta fase aportó evidencia cuantitativa sobre el impacto hidrológico de la expansión urbana y permitirá fundamentar las conclusiones del estudio.

1) Creación del Basin Model en HEC-HMS

Se inició un nuevo proyecto seleccionando unidades métricas (mm–m–m³/s). Se importó la delimitación de la cuenca y se dividirá en subcuencas hidrológicamente homogéneas utilizando los límites obtenidos en ArcGIS.

Cada subcuenca fue representada mediante elementos Subbasin, interconectados con Reach, Junction y un Sink como punto de salida en la zona de la Av. Manuelita Sáenz. Para cada subcuenca se ingresó su área, pendiente media, longitud del cauce y parámetros previamente calculados (Tc, CN y S) [6].

La microcuenca fue modelada en HEC-HMS mediante un esquema agregado, representándola como una única subcuenca, debido a su reducida extensión superficial, inferior a 20 km², rango dentro del cual el comportamiento hidrológico puede considerarse globalmente uniforme sin necesidad de una discretización espacial más detallada [23]. Los modelos de parámetros concentrados resultan adecuados cuando la variabilidad espacial interna no ejerza una influencia significativa en la respuesta hidrológica global de la cuenca, especialmente en áreas pequeñas. Asimismo, en cuencas de poca extensión, el uso de valores promedio de las características físicas ofrece resultados aceptables en los análisis hidrológicos.

2) Asignación de métodos hidrológicos

Método de pérdidas: se utilizó el método SCS Curve Number, asignando valores de CN para 2014 y 2022 según el uso del suelo procesado previamente.

Transformación lluvia–escorrentía: se aplicó el método SCS Unit Hydrograph, ingresando el tiempo de concentración (Tc) calculado en la etapa correspondiente.

Caudal base: se empleó un caudal base nulo o mínimo, debido al carácter urbano de la cuenca [3].

Conexión de la subcuenca al punto de aforo: mediante la herramienta “*Connect Elements*” se vinculó la subcuenca al punto de aforo, garantizando la correcta conducción de la escorrentía [6].

3) Construcción del Meteorologic Model

Se generó un Meteorologic Model denominado “Lluvia de Diseño Hietograma por Bloques”.

Se ingresaron los hietogramas por bloques de 10, 25 y 50 años, contruidos a partir de las curvas IDF mediante el método de bloques alternos.

Se asignó la lluvia uniforme a todas las subcuencas, tomando en cuenta que el área total es menor a 25 km².

Este modelo meteorológico fue idéntico para ambos escenarios (2014 y 2022), garantizando que cualquier diferencia en la esorrentía se deba únicamente al cambio de uso del suelo [6].

4) Configuración de las Control Specifications

Se definió una duración de tormenta acorde al hietograma generado (por ejemplo, de 1 a 6 horas, según la duración utilizada en los bloques alternos). Se fijó un intervalo de cálculo coherente con la resolución del hietograma ($\Delta t = 1\text{--}5$ min) [6].

5) Ejecución de las simulaciones

Se crearon dos Simulation Runs:

- Simulación 2014
- Simulación 2022

Cada corrida combinó:

- El *Basin Model* correspondiente
- El *Meteorologic Model* con hietograma por bloques
- Las *Control Specifications* definidas

Se verificó la consistencia del modelo (conexiones, parámetros, unidades). Se ejecutaron las simulaciones para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años en ambos escenarios [6].

6) Obtención y análisis de resultados

Se extrajeron los hidrogramas de salida en el punto de control ubicado en el tramo Manuelita Sáenz.

Se identificarán los valores de:

- Caudal pico (Q_p)
- Tiempo al pico (T_p)
- Volumen total de escorrentía

Los resultados se exportaron para análisis comparativo y gráficas.

7) Comparación entre escenarios (2014 vs 2022)

Se comparó la escorrentía generada por los hietogramas por bloques para cada año. Se analizó el efecto del crecimiento urbano (mayor CN, menor infiltración) en el aumento del caudal pico y la rapidez de la respuesta hidrológica.

Se generaron tablas y gráficos comparativos entre ambos escenarios. Finalmente, se discutieron las implicaciones hidráulicas y urbanas, enfocándose en el aumento de escorrentía superficial por el cambio de uso del suelo.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. FASE 1: DELIMITACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIAL EN ARCGIS

Se obtuvo la delimitación completa de la microcuenca junto con su red de drenaje principal (ver figura 10) identificando sus afluentes y puntos de control. La cuenca presenta un área aproximada de 3.0282 km² y una longitud total de la red de drenaje de 5.114 km, valores determinados mediante análisis en ArcGIS.



Fig. 10 Delimitación de la microcuenca.

Se obtuvo el mapa de uso y cobertura del suelo para cada uno de los años analizados (ver figura 11,12), lo que permitió identificar los cambios espaciales en la ocupación del territorio. Estos mapas fueron procesados en ArcGIS y sirvieron como insumo clave para asignar los valores de Curve Number (CN) correspondientes a cada escenario, posibilitando la comparación hidrológica entre 2014 y 2022.

2014:

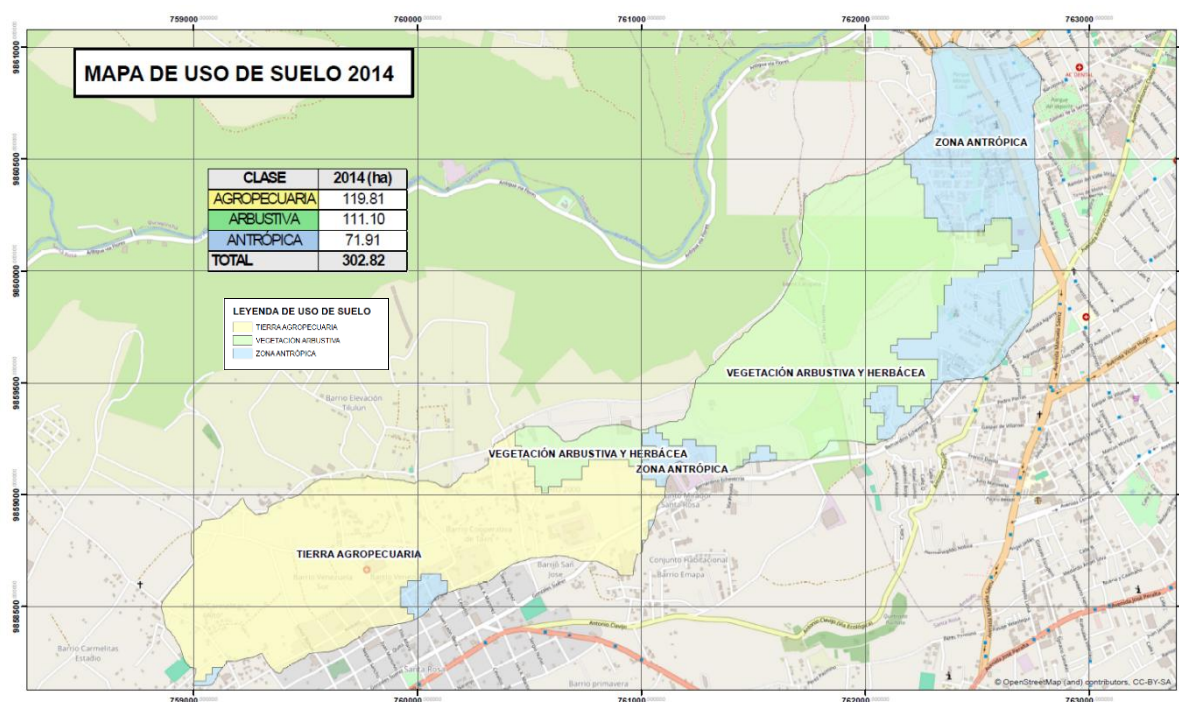


Fig. 11 Mapa de uso y cobertura del suelo año 2014.

2022:

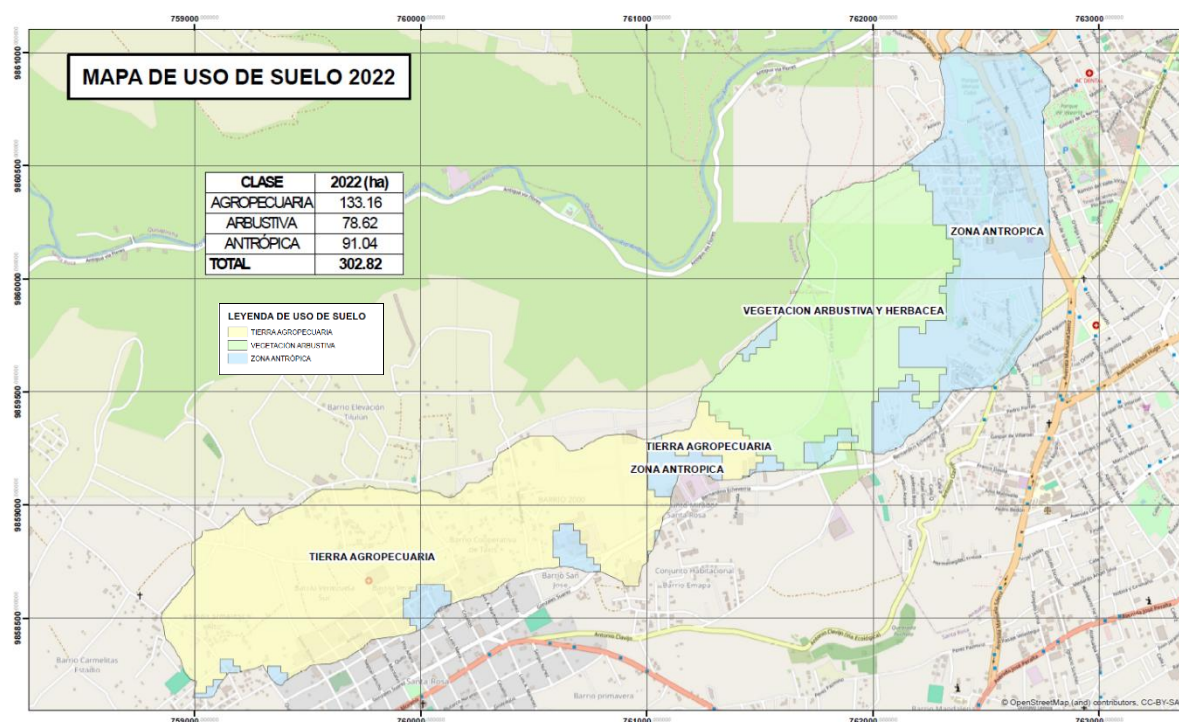


Fig. 12 Mapa y uso de cobertura del suelo año 2022.

TABLA VI
TABLA COMPARATIVA 2014 - 2022

USO DE SUELO	2014 (ha)	2022 (ha)	Δ (ha)	Δ (%)
AGROPECUARIA	119.81	133.16	13.35	11%
ARBUSTIVA	111.10	78.62	-32.48	-29%
ANTRÓPICA	71.91	91.04	19.12	27%
TOTAL	302.82	302.82		

Tanto para el año 2014 como para el 2022 se identificaron los mismos tipos de uso del suelo en la microcuenca, predominando las categorías agropecuaria, arbustiva y antrópica. La comparación del uso de suelo entre 2014 y 2022 evidencia cambios significativos en la distribución de coberturas dentro de la microcuenca. La superficie agropecuaria presenta un incremento de 13.35 ha (11%), mientras que la cobertura arbustiva experimenta una reducción notable de 32.48 ha (-29%), lo que indica un proceso de sustitución hacia actividades humanas y agrícolas. Por su parte, el uso antrópico aumenta en 19.12 ha (27%), reflejando la expansión urbana y la ocupación del territorio. A pesar de estas variaciones internas, el área total de la cuenca se mantiene constante en 302.82 ha, lo que confirma que los cambios corresponden únicamente a transformaciones en la cobertura del suelo y no a diferencias de delimitación espacial.

B. FASE 2: PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

Se determinó el tipo de suelo correspondiente a la microcuenca con el objetivo de asignar los valores de Curve Number (CN) para cada uno de los años analizados ver figuras (13,14). Este proceso se realizó en ArcGIS mediante la intersección de la delimitación de la cuenca con la cartografía edáfica proporcionada por el Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua. La clasificación hidrológica de los suelos se realizó siguiendo el esquema estándar de grupos A, B, C y D, el cual se basa en la textura y la capacidad de infiltración del terreno. En el caso de la microcuenca analizada, se identificaron estos cuatro grupos: A (arenoso), B (franco arenoso), C (franco arcilloso) y D (arcilloso), cada uno con características específicas que influyen directamente en la generación de escorrentía [3]. Esta categorización permitió asociar adecuadamente los valores de Curve Number (CN) según el tipo de cobertura y las propiedades texturales del suelo, asegurando una estimación precisa de las pérdidas por infiltración en cada escenario anual.

2014:

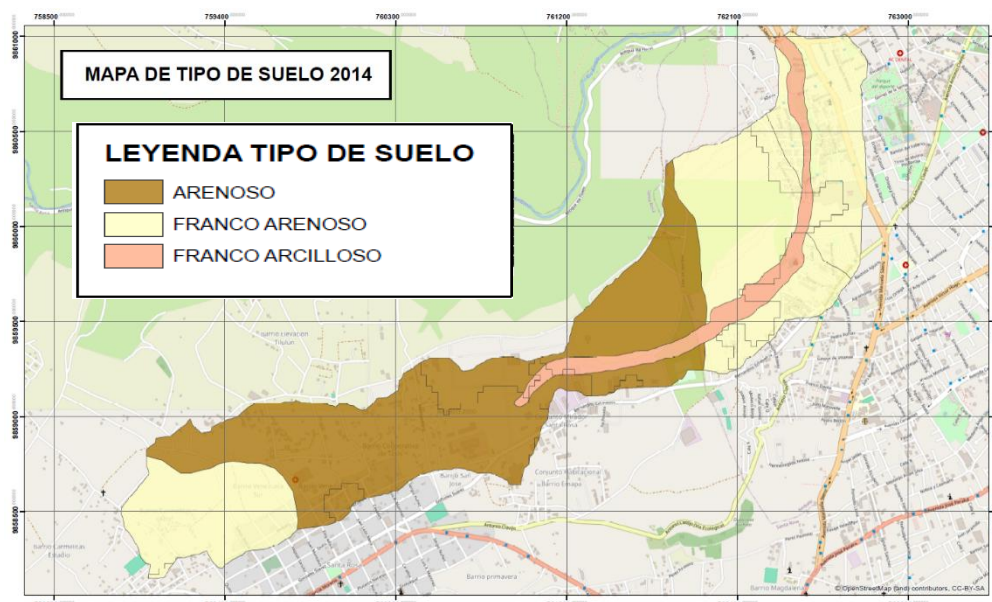


Fig. 13 Clasificación hidrológica año 2014.

2022:

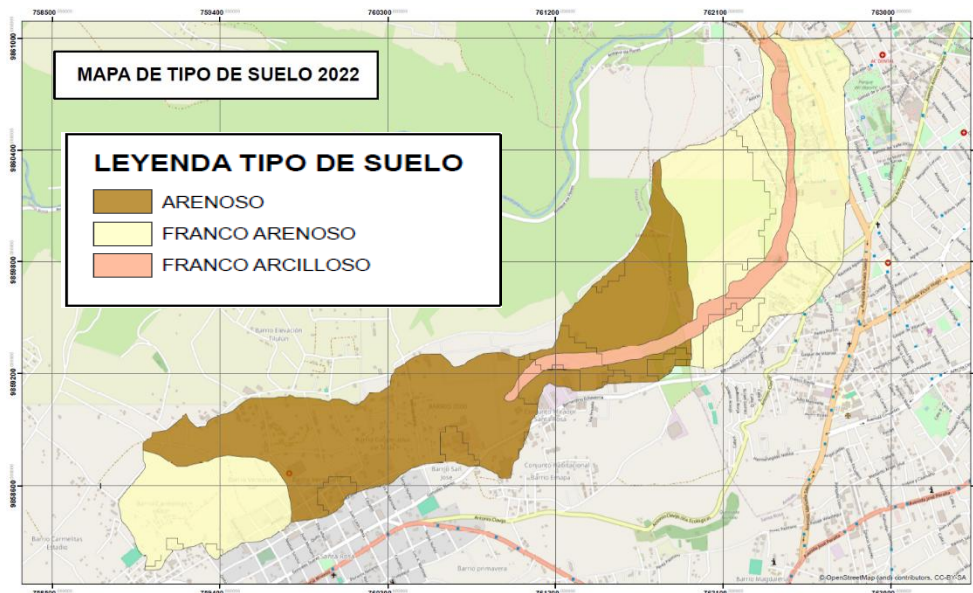


Fig. 14 Clasificación hidrológica año 2022

A partir de la intersección entre el mapa de uso del suelo y la cartografía de suelos se obtuvieron las áreas (ha) de cada combinación de clase de cobertura (agropecuaria, arbustiva y antrópica) y tipo de textura (arenoso–A, franco arenoso–B, franco arcilloso–C y arcilloso–D). A cada combinación se le asignó un valor de Curve Number (CN) según la metodología SCS, y posteriormente se calculó el producto CN·Área para estimar el CN ponderado de la microcuenca en cada año.

TABLA VII
CN AÑO 2014

2014	CLASE	TEXTURA	TIPO	Área (ha)	CN	CN*área
	AGROPECUARIA	ARENOSO	A	79.48	67	5324.88
		FRANCO ARENOSO	B	40.04	78	3122.96
		FRANCO ARCILLOSO	C	0.29	85	24.83
		ARCILLOSO	D			
	ARBUSTIVA	ARENOSO	A	52.09	35	1823.15
		FRANCO ARENOSO	B	46.81	56	2621.17
		FRANCO ARCILLOSO	C	12.20	70	854.22
		ARCILLOSO	D			
	ANTRÓPICA	ARENOSO	A	6.94	77	534.47
		FRANCO ARENOSO	B	54.78	85	4655.89
		FRANCO ARCILLOSO	C	10.20	90	917.71
		ARCILLOSO	D			
	TOTAL			302.82		19879.28

CN=	65.65
-----	-------

Para el año 2014 se obtuvo la distribución de áreas por combinación de uso del suelo y tipo de textura, lo que permitió asignar los valores de Curve Number (CN) correspondientes según la metodología SCS. Al multiplicar cada CN por su área asociada (CN·Área) y sumar los aportes individuales, se obtuvo un valor total de 19 879.28. Al dividir este valor entre el área total de la cuenca (302.82 ha), se calculó un CN ponderado de **65.65**.

TABLA VIII
CN AÑO 2022

	CLASE	TEXTURA	TIPO	Área (ha)	CN	CN*área
2022	AGROPECUARIA	ARENOSO	A	90.98	67	6095.76
		FRANCO ARENOSO	B	39.07	78	3047.43
		FRANCO ARCILLOSO	C	3.11	85	264.10
		ARCILLOSO	D			
	ARBUSTIVA	ARENOSO	A	34.74	35	1215.92
		FRANCO ARENOSO	B	37.53	56	2101.59
		FRANCO ARCILLOSO	C	6.35	70	444.82
		ARCILLOSO	D			
	ANTRÓPICA	ARENOSO	A	12.79	77	984.45
		FRANCO ARENOSO	B	65.02	85	5526.86
		FRANCO ARCILLOSO	C	13.23	90	1190.73
		ARCILLOSO	D			
			TOTAL	302.82		20871.64

CN=	68.92
-----	--------------

Para el año 2022 se realizó la distribución del uso del suelo en combinación con los tipos de textura identificados dentro de la microcuenca, lo que permitió asignar los valores de Curve Number (CN) correspondientes según la clasificación hidrológica SCS. A partir de las áreas de cada categoría y su CN asociado, se calculó el producto CN·Área, obteniéndose un valor acumulado de 20 871.64. Al dividir este valor entre el área total de la cuenca (302.82 ha), se determinó un CN ponderado de **68.92**, reflejando un incremento respecto al año 2014.

El Tiempo de Concentración (T_c) de la microcuenca se obtuvo mediante el método de Kirpich, seleccionado por ser adecuado para cuencas pequeñas y con un nivel de consolidación significativo, como es el caso del área de estudio. Para el cálculo se empleó la longitud hidráulica del cauce principal, que corresponde a 5114 metros, y el pendiente promedio derivada de la diferencia altitudinal entre el punto más alto (3033 msnm) y el punto de salida (2617 msnm), lo que representa una caída de 416 metros a lo largo del flujo. Con estos parámetros, la ecuación de Kirpich permitió estimar el tiempo requerido para que una gota precipitada en el extremo más distante de la cuenca alcance la salida, aportando un valor representativo de la rapidez de respuesta hidrológica bajo las condiciones topográficas y de ocupación actuales.

Datos

- $L = 5\,114\text{ m}$
- Diferencia de altura: $\Delta H = 3033 - 2617 = 416\text{ m}$
- Pendiente:

$$S = \frac{\Delta H}{L} = \frac{416}{5114} \approx 0.0813 \quad (5)$$

Cálculo (*utilizando Ec. 2*)

$$T_c = 0.01947 \times (5114)^{0.77} \times (0.0813)^{-0.385}$$

$$T_c \approx 36.7\text{ minutos}$$

En horas:

$$T_c \approx \frac{36.7}{60} \approx 0.61\text{ h}$$

Resultado final:

$T_c \approx 36.7\text{ minutos } (\approx 0.61\text{ h})$ para la microcuenca, calculado con el método de Kirpich.

Además del cálculo del tiempo de concentración total, se determinó el valor de $0.6 T_c$, requerido por el método SCS para la definición del tiempo de retardo (T_{lag}) en la modelación hidrológica dentro de HEC-HMS [6]. A partir del tiempo de concentración obtenido mediante el método de Kirpich (36.7 minutos), se calculó que el:

$$0.6 T_c = 22.02 \text{ minutos}$$

Valor que fue empleado como parámetro de entrada en la simulación lluvia–escorrentía.

$$0.6T_c=0.6\times36.7=22.02 \text{ minutos}$$

Con el tiempo de concentración calculado ($T_c = 36.7$ minutos), se obtuvo el valor de $1.5T_c = 0.915$ horas. De acuerdo con [3] y [5], si $1.5T_c \leq 3$ horas, la duración del evento debe ubicarse entre 3 y 6 horas. En este caso, como el valor obtenido se encuentra dentro del primer rango, se seleccionó una duración de tormenta de **5 horas**, lo cual cumple con el criterio establecido y garantiza una representación hidrológica adecuada para la modelación en HEC-HMS.

De igual manera, para definir el intervalo de cálculo empleado en la simulación hidrológica se aplicó el criterio de consistencia temporal que establece que:

$$\Delta t \leq 0.2 \cdot T_c.$$

Con el tiempo de concentración estimado ($T_c = 36.7$ minutos), se obtuvo un valor límite de: $0.2T_c = 7.34$ minutos.

En función de este resultado, se seleccionó un intervalo de simulación de 5 minutos, el cual se encuentra dentro del rango permitido y garantiza una adecuada resolución temporal en la generación del hidrograma dentro de HEC-HMS.

Interpolación de las curvas IDF:

T (min)	Periodo de Retorno T (años)					
	2	5	10	25	50	100
5	49.8	63.5	76.3	97.2	116.7	140.2
10	34.8	44.3	53.2	67.8	81.5	97.8
15	28.2	35.9	43.1	54.9	66.0	79.3
20	24.3	30.9	37.1	47.3	56.8	68.3
30	20.1	24.7	28.7	35.2	41.0	47.7
60	11.9	14.6	17.0	20.8	24.2	28.2
120	7.8	9.1	10.3	12.0	13.5	15.2
360	3.0	3.5	4.0	4.6	5.2	5.9
1440	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8

INTENSIDAD MAXIMA (mm/h)

Fig. 15 Tabla de Interpolación de curvas IDF – INAMHI [10].

A partir de la tabla IDF proporcionada por el INAMHI, se obtuvieron las intensidades de lluvia para los periodos de retorno analizados. Sin embargo, la tabla solo presenta valores para ciertas duraciones fijas (5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 360 y 1440 minutos).

Debido a que la tormenta de diseño seleccionada requiere intensidades en un intervalo de tiempo específico (5 minutos), fue necesario estimar los valores faltantes mediante interpolación logarítmica. Este procedimiento permite calcular intensidades intermedias entre dos duraciones conocidas, siguiendo la relación logarítmica típica entre la intensidad y el tiempo de lluvia. De esta manera, se obtuvieron valores consistentes y matemáticamente ajustados para construir el hietograma por bloques usado en la modelación hidrológica.

La interpolación se basa en que la intensidad cambia de manera logarítmica con la duración.

Por eso, para obtener la intensidad i en un tiempo t que está entre dos duraciones conocidas t_1 y t_2 , se usa:

$$\ln(i) = \ln(i_1) + \left[\frac{\ln(i_2) - \ln(i_1)}{\ln(t_2) - \ln(t_1)} \right] (\ln(t) - \ln(t_1))$$

Y luego se despeja:

$$i = e^{\ln(i)}$$

Obteniendo la siguiente tabla de IDF de la estación meteorológica M0066 Ambato Aeropuerto:

TABLA IX
PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)

T (min)	2	5	10	25	50	100
5.00	49.80	63.50	76.30	97.20	116.70	140.20
10.00	34.80	44.30	53.20	67.80	81.50	97.80
15.00	28.20	35.90	43.10	54.90	66.00	79.30
20.00	24.30	30.90	37.10	47.30	56.80	68.30
25.00	21.89	27.32	32.21	40.20	47.47	56.06
30.00	20.10	24.70	28.70	35.20	41.00	47.70
35.00	17.89	21.97	25.54	31.31	36.46	42.44
40.00	16.17	19.86	23.09	28.30	32.94	38.35
45.00	14.79	18.16	21.13	25.88	30.12	35.07
50.00	13.66	16.77	19.51	23.89	27.80	32.38
55.00	12.71	15.60	18.16	22.22	25.86	30.12
60.00	11.90	14.60	17.00	20.80	24.20	28.20
65.00	11.33	13.82	16.04	19.52	22.62	26.26
70.00	10.83	13.14	15.21	18.41	21.25	24.58
75.00	10.39	12.54	14.47	17.42	20.05	23.11
80.00	9.99	12.00	13.81	16.55	18.99	21.82
85.00	9.62	11.51	13.22	15.78	18.05	20.67
90.00	9.29	11.07	12.68	15.08	17.20	19.64
95.00	8.99	10.67	12.19	14.44	16.43	18.72
100.00	8.72	10.30	11.75	13.87	15.74	17.88
105.00	8.46	9.97	11.34	13.34	15.11	17.12
110.00	8.22	9.66	10.97	12.86	14.53	16.43
115.00	8.00	9.37	10.62	12.41	13.99	15.79
120.00	7.80	9.10	10.30	12.00	13.50	15.20
125.00	7.53	8.78	9.94	11.58	13.03	14.67
130.00	7.28	8.49	9.61	11.19	12.59	14.19
135.00	7.04	8.21	9.31	10.83	12.19	13.73
140.00	6.82	7.96	9.02	10.49	11.81	13.31
145.00	6.62	7.72	8.75	10.17	11.45	12.91
150.00	6.42	7.49	8.50	9.88	11.12	12.54
155.00	6.24	7.28	8.26	9.60	10.81	12.19
160.00	6.07	7.09	8.04	9.34	10.52	11.86
165.00	5.91	6.90	7.83	9.09	10.24	11.55
170.00	5.76	6.72	7.63	8.85	9.98	11.26
175.00	5.62	6.55	7.44	8.63	9.73	10.98
180.00	5.48	6.40	7.26	8.42	9.49	10.72
185.00	5.35	6.25	7.10	8.22	9.27	10.47
190.00	5.23	6.10	6.93	8.04	9.06	10.23
195.00	5.11	5.97	6.78	7.86	8.86	10.00
200.00	5.00	5.84	6.63	7.68	8.66	9.79

T (min)	2	5	10	25	50	100
205.00	4.90	5.71	6.50	7.52	8.48	9.58
210.00	4.79	5.59	6.36	7.36	8.30	9.39
215.00	4.70	5.48	6.23	7.21	8.14	9.20
220.00	4.60	5.37	6.11	7.07	7.98	9.02
225.00	4.51	5.27	6.00	6.93	7.82	8.84
230.00	4.43	5.17	5.88	6.80	7.67	8.68
235.00	4.35	5.07	5.77	6.67	7.53	8.52
240.00	4.27	4.98	5.67	6.55	7.39	8.37
245.00	4.19	4.89	5.57	6.44	7.26	8.22
250.00	4.12	4.81	5.48	6.32	7.14	8.08
255.00	4.05	4.72	5.38	6.22	7.02	7.94
260.00	3.98	4.65	5.29	6.11	6.90	7.81
265.00	3.92	4.57	5.21	6.01	6.78	7.68
270.00	3.85	4.50	5.12	5.91	6.68	7.56
275.00	3.79	4.42	5.04	5.82	6.57	7.44
280.00	3.73	4.36	4.97	5.73	6.47	7.33
285.00	3.68	4.29	4.89	5.64	6.37	7.22
290.00	3.62	4.22	4.82	5.56	6.27	7.11
295.00	3.57	4.16	4.75	5.47	6.18	7.00
300.00	3.52	4.10	4.68	5.39	6.09	6.90

Una vez obtenidas las intensidades de lluvia para los intervalos requeridos mediante la interpolación logarítmica de la tabla IDF del INAMHI, se procedió a construir los hietogramas correspondientes a cada periodo de retorno analizado. Para ello se aplicó la metodología de *bloques alternos*, la cual organiza las intensidades en orden descendente y coloca el valor máximo dentro del 40% de la duración total de la tormenta, ya que esta posición refleja de manera más realista el comportamiento típico de cuencas pequeñas y urbanizadas, donde los picos de precipitación suelen ocurrir antes de la mitad del evento distribuyendo los bloques restantes hacia ambos lados de manera alternada. [5]

Este procedimiento permite obtener un hietograma sintético que representa adecuadamente la variación temporal de la lluvia, manteniendo el volumen total del evento y garantizando que el pico de precipitación ocurra en la parte media de la tormenta. Los hietogramas por bloques generados para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años fueron utilizados como insumo principal en la modelación lluvia–escorrentía en HEC-HMS.

1) *Conversión de intensidades IDF a profundidades por intervalo*

Con las intensidades IDF obtenidas para cada duración, se calculó la **profundidad de lluvia por intervalo de 5 min**:

$$h_j = i_j \cdot \frac{5}{60} \quad (6)$$

Donde:

- i_j : intensidad en mm/h
- $\Delta t = 5\text{min}$
- h_j : profundidad incremental en mm

Esto genera la columna “**Profundidad Incremental (mm)**”.

2) *Cálculo de la profundidad acumulada*

La profundidad acumulada se obtuvo mediante una suma progresiva:

$$H_j = \sum_{k=1}^j h_k \quad (7)$$

Representado en la columna “**Profundidad Acumulada (mm)**”.

3) *Determinación del número de bloques y posición del pico*

Con una duración total de:

$$D = 300 \text{ min}$$

y un intervalo de:

$$\Delta t = 5 \text{ min}$$

el número de bloques fue:

$$N = \frac{D}{\Delta t} = \frac{300}{5} = 60$$

La posición del bloque máximo (40% de la duración):

$$k = 0.40 \cdot N = 24$$

En la tabla, este corresponde al bloque resaltado (el valor más alto acomodado) el cual es está ubicado al 40% en orden de valores de precipitación.

4) *Aplicación del método de bloques alternos*

- Ordenar las profundidades incrementales de mayor a menor.
- Ubicar la mayor en la posición $k(40\%)$.
- Asignar las siguientes alternando hacia ambos lados:

$$H'(k) = h_{(1)}$$

$$H'(k + 1) = h_{(2)}, H'(k - 1) = h_{(3)}$$

$$H'(k + 2) = h_{(4)}, H'(k - 2) = h_{(5)}, \text{ etc.}$$

Esto crea la columna final “**Precipitación (mm)**”, ordenada temporalmente.

5) *Obtención del hietograma final*

La columna “Tiempo (min)” junto con la columna “Precipitación (mm)” constituye el hietograma por bloques alternos, que:

- Conserva el volumen total del evento.
- Respeta las intensidades IDF calculadas.
- Posiciona el pico de lluvia al 40% del evento.
- Genera una distribución temporal adecuada para HEC-HMS.

TABLA X
HIETOGRAMA $T = 10$

Método de bloque alterno			Periodo de retorno		10	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
5.00	76.30	6.35834	6.35834	0	5	0.069
10.00	53.20	8.86667	2.50833	5	10	0.072
15.00	43.10	10.77500	1.90833	10	15	0.074
20.00	37.10	12.36667	1.59167	15	20	0.078
25.00	32.21	13.42160	1.05493	20	25	0.081
30.00	28.70	14.35000	0.92840	25	30	0.085
35.00	25.54	14.90114	0.55114	30	35	0.090
40.00	23.09	15.39563	0.49449	35	40	0.094
45.00	21.13	15.84541	0.44978	40	45	0.100
50.00	19.51	16.25888	0.41347	45	50	0.106
55.00	18.16	16.64219	0.38331	50	55	0.113
60.00	17.00	17.00000	0.35781	55	60	0.242
65.00	16.04	17.38129	0.38129	60	65	0.258
70.00	15.21	17.74192	0.36063	65	70	0.276
75.00	14.47	18.08438	0.34246	70	75	0.299
80.00	13.81	18.41072	0.32634	75	80	0.326
85.00	13.22	18.72263	0.31191	80	85	0.358
90.00	12.68	19.02154	0.29891	85	90	0.381
95.00	12.19	19.30867	0.28713	90	95	0.413
100.00	11.75	19.58508	0.27641	95	100	0.494
105.00	11.34	19.85168	0.26660	100	105	0.928
110.00	10.97	20.10924	0.25756	105	110	1.592
115.00	10.62	20.35848	0.24924	110	115	2.508
120.00	10.30	20.60000	0.24152	115	120	6.358
125.00	9.94	20.71727	0.11727	120	125	1.908

Método de bloque alterno			Periodo de retorno		10	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
130.00	9.61	20.83056	0.11329	125	130	1.055
135.00	9.31	20.94017	0.10961	130	135	0.551
140.00	9.02	21.04633	0.10616	135	140	0.450
145.00	8.75	21.14927	0.10294	140	145	0.383
150.00	8.50	21.24921	0.09994	145	150	0.361
155.00	8.26	21.34631	0.09710	150	155	0.342
160.00	8.04	21.44076	0.09445	155	160	0.312
165.00	7.83	21.53270	0.09194	160	165	0.287
170.00	7.63	21.62227	0.08957	165	170	0.267
175.00	7.44	21.70959	0.08732	170	175	0.249
180.00	7.26	21.79480	0.08521	175	180	0.117
185.00	7.10	21.87799	0.08319	180	185	0.110
190.00	6.93	21.95927	0.08128	185	190	0.103
195.00	6.78	22.03873	0.07946	190	195	0.097
200.00	6.63	22.11646	0.07773	195	200	0.092
205.00	6.50	22.19252	0.07606	200	205	0.087
210.00	6.36	22.26701	0.07449	205	210	0.083
215.00	6.23	22.33999	0.07298	210	215	0.079
220.00	6.11	22.41151	0.07152	215	220	0.076
225.00	6.00	22.48166	0.07015	220	225	0.073
230.00	5.88	22.55047	0.06881	225	230	0.070
235.00	5.77	22.61801	0.06754	230	235	0.068
240.00	5.67	22.68432	0.06631	235	240	0.066
245.00	5.57	22.74945	0.06513	240	245	0.065
250.00	5.48	22.81345	0.06400	245	250	0.064
255.00	5.38	22.87635	0.06290	250	255	0.063
260.00	5.29	22.93820	0.06185	255	260	0.062
265.00	5.21	22.99904	0.06084	260	265	0.061

Método de bloque alterno			Periodo de retorno		10	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
270.00	5.12	23.05890	0.05986	265	270	0.060
275.00	5.04	23.11781	0.05891	270	275	0.059
280.00	4.97	23.17580	0.05799	275	280	0.058
285.00	4.89	23.23291	0.05711	280	285	0.057
290.00	4.82	23.28916	0.05625	285	290	0.056
295.00	4.75	23.34459	0.05543	290	295	0.055
300.00	4.68	23.39921	0.05462	295	300	0.055

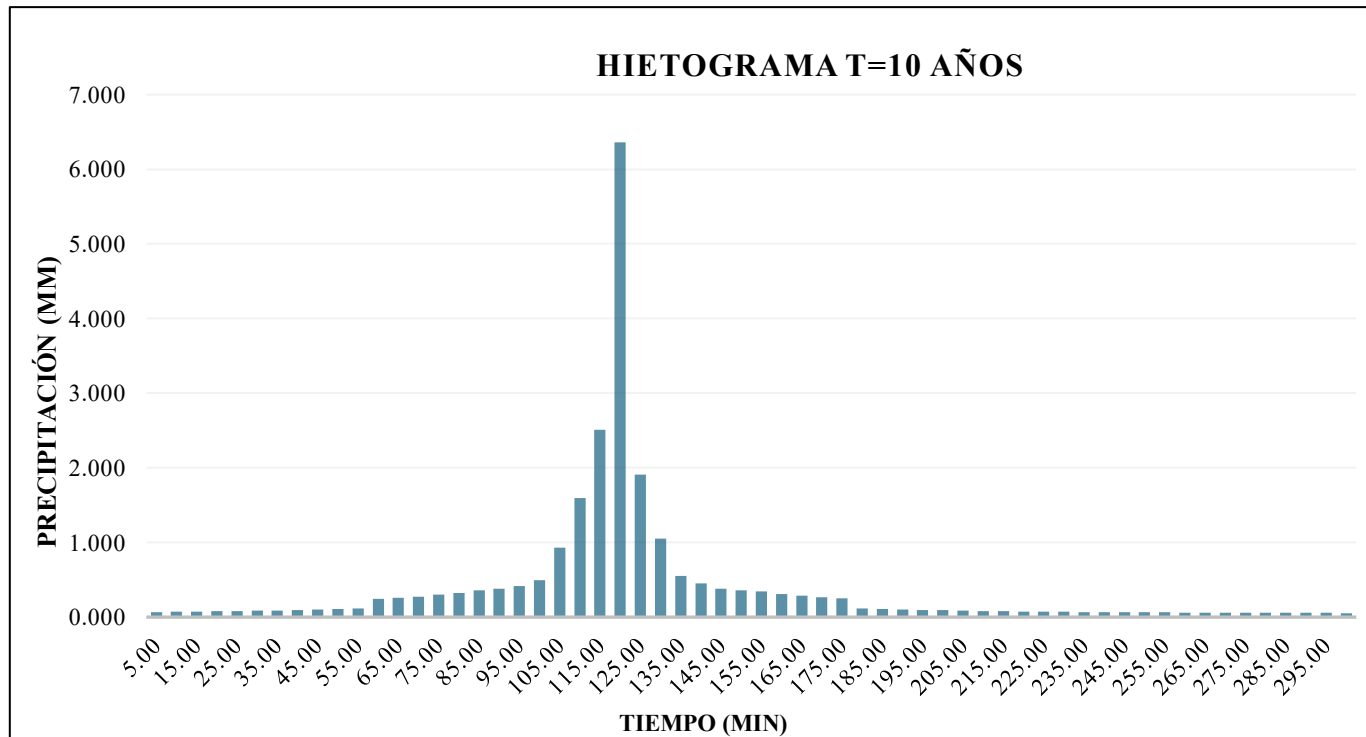


Fig. 16 Hietograma T = 10.

TABLA XI
HIETOGRAMA T=25

MÉTODO DE BLOQUE ALTERNO			Periodo de retorno		25	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
5.00	97.20	8.1	8.100000	0	5	0.073
10.00	67.80	11.3	3.200000	5	10	0.076
15.00	54.90	13.725	2.425000	10	15	0.079
20.00	47.30	15.76667	2.041670	15	20	0.082
25.00	40.20	16.75063	0.983960	20	25	0.086
30.00	35.20	17.6	0.849370	25	30	0.090
35.00	31.31	18.26617	0.666170	30	35	0.095
40.00	28.30	18.86358	0.597410	35	40	0.100
45.00	25.88	19.40672	0.543140	40	45	0.106
50.00	23.89	19.90582	0.499100	45	50	0.113
55.00	22.22	20.36836	0.462540	50	55	0.121
60.00	20.80	20.8	0.431640	55	60	0.210
65.00	19.52	21.14658	0.346580	60	65	0.225
70.00	18.41	21.4726	0.326020	65	70	0.243
75.00	17.42	21.78064	0.308040	70	75	0.265
80.00	16.55	22.07279	0.292150	75	80	0.292
85.00	15.78	22.35078	0.277990	80	85	0.326
90.00	15.08	22.6161	0.265320	85	90	0.432
95.00	14.44	22.86996	0.253860	90	95	0.499
100.00	13.87	23.11342	0.243460	95	100	0.597
105.00	13.34	23.34742	0.234000	100	105	0.849
110.00	12.86	23.57273	0.225310	105	110	2.042
115.00	12.41	23.79005	0.217320	110	115	3.200
120.00	12.00	24	0.209950	115	120	8.100

MÉTODO DE BLOQUE ALTERNO			Periodo de retorno		25	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
125.00	11.58	24.12497	0.124970	120	125	2.425
130.00	11.19	24.24564	0.120670	125	130	0.984
135.00	10.83	24.36233	0.116690	130	135	0.666
140.00	10.49	24.4753	0.112970	135	140	0.543
145.00	10.17	24.58481	0.109510	140	145	0.463
150.00	9.88	24.69107	0.106260	145	150	0.347
155.00	9.60	24.79428	0.103210	150	155	0.308
160.00	9.34	24.89463	0.100350	155	160	0.278
165.00	9.09	24.99227	0.097640	160	165	0.254
170.00	8.85	25.08737	0.095100	165	170	0.234
175.00	8.63	25.18005	0.092680	170	175	0.217
180.00	8.42	25.27046	0.090410	175	180	0.125
185.00	8.22	25.35869	0.088230	180	185	0.117
190.00	8.04	25.44487	0.086180	185	190	0.110
195.00	7.86	25.52909	0.084220	190	195	0.103
200.00	7.68	25.61145	0.082360	195	200	0.098
205.00	7.52	25.69203	0.080580	200	205	0.093
210.00	7.36	25.77092	0.078890	205	210	0.088
215.00	7.21	25.84818	0.077260	210	215	0.084
220.00	7.07	25.92388	0.075700	215	220	0.081
225.00	6.93	25.9981	0.074220	220	225	0.077
230.00	6.80	26.0709	0.072800	225	230	0.074
235.00	6.67	26.14232	0.071420	230	235	0.071
240.00	6.55	26.21244	0.070120	235	240	0.070
245.00	6.44	26.28129	0.068850	240	245	0.069
250.00	6.32	26.34892	0.067630	245	250	0.068
255.00	6.22	26.41538	0.066460	250	255	0.066

MÉTODO DE BLOQUE ALTERNO			Periodo de retorno		25	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
260.00	6.11	26.48072	0.065340	255	260	0.065
265.00	6.01	26.54496	0.064240	260	265	0.064
270.00	5.91	26.60816	0.063200	265	270	0.063
275.00	5.82	26.67035	0.062190	270	275	0.062
280.00	5.73	26.73155	0.061200	275	280	0.061
285.00	5.64	26.79181	0.060260	280	285	0.060
290.00	5.56	26.85115	0.059340	285	290	0.059
295.00	5.47	26.90961	0.058460	290	295	0.058
300.00	5.39	26.96721	0.057600	295	300	0.058

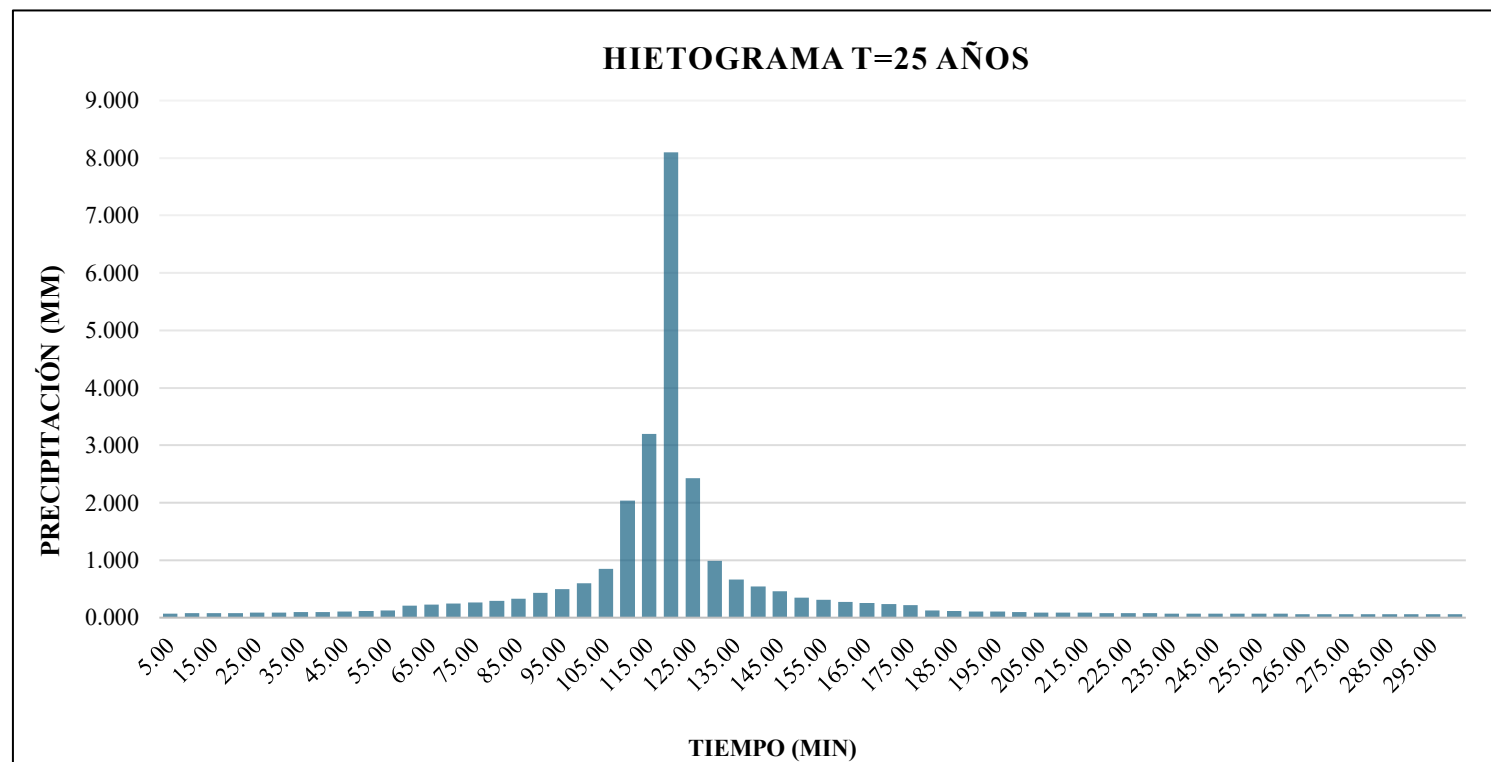


Fig. 17 Hietograma T = 25.

TABLA XII
HIETOGRAMA T = 50

Método de bloque alterno			Periodo de retorno		50	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
5.00	116.70	9.72500	9.725	0	5	0.0850
10.00	81.50	13.58334	3.85834	5	10	0.0883
15.00	66.00	16.50000	2.91666	10	15	0.0920
20.00	56.80	18.93334	2.43334	15	20	0.0961
25.00	47.47	19.78011	0.84677	20	25	0.1005
30.00	41.00	20.50000	0.71989	25	30	0.1054
35.00	36.46	21.27061	0.77061	30	35	0.1108
40.00	32.94	21.96151	0.6909	35	40	0.1169
45.00	30.12	22.58953	0.62802	40	45	0.1238
50.00	27.80	23.16652	0.57699	45	50	0.1316
55.00	25.86	23.70116	0.53464	50	55	0.1405
60.00	24.20	24.20000	0.49884	55	60	0.1809
65.00	22.62	24.50791	0.30791	60	65	0.1950
70.00	21.25	24.79647	0.28856	65	70	0.2117
75.00	20.05	25.06817	0.2717	70	75	0.2319
80.00	18.99	25.32502	0.25685	75	80	0.2569
85.00	18.05	25.56869	0.24367	80	85	0.2886
90.00	17.20	25.80058	0.23189	85	90	0.4988
95.00	16.43	26.02186	0.22128	90	95	0.5770
100.00	15.74	26.23355	0.21169	95	100	0.6909
105.00	15.11	26.43650	0.20295	100	105	0.7706
110.00	14.53	26.63146	0.19496	105	110	2.4333
115.00	13.99	26.81911	0.18765	110	115	3.8583
120.00	13.50	27.00000	0.18089	115	120	9.7250

Método de bloque alterno			Periodo de retorno		50	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
125.00	13.03	27.14545	0.14545	120	125	2.9167
130.00	12.59	27.28592	0.14047	125	130	0.8468
135.00	12.19	27.42178	0.13586	130	135	0.7199
140.00	11.81	27.55334	0.13156	135	140	0.6280
145.00	11.45	27.68088	0.12754	140	145	0.5346
150.00	11.12	27.80466	0.12378	145	150	0.3079
155.00	10.81	27.92490	0.12024	150	155	0.2717
160.00	10.52	28.04182	0.11692	155	160	0.2437
165.00	10.24	28.15561	0.11379	160	165	0.2213
170.00	9.98	28.26645	0.11084	165	170	0.2030
175.00	9.73	28.37448	0.10803	170	175	0.1876
180.00	9.49	28.47987	0.10539	175	180	0.1454
185.00	9.27	28.58275	0.10288	180	185	0.1359
190.00	9.06	28.68324	0.10049	185	190	0.1275
195.00	8.86	28.78146	0.09822	190	195	0.1202
200.00	8.66	28.87752	0.09606	195	200	0.1138
205.00	8.48	28.97152	0.094	200	205	0.1080
210.00	8.30	29.06354	0.09202	205	210	0.1029
215.00	8.14	29.15368	0.09014	210	215	0.0982
220.00	7.98	29.24202	0.08834	215	220	0.0940
225.00	7.82	29.32863	0.08661	220	225	0.0901
230.00	7.67	29.41358	0.08495	225	230	0.0866
235.00	7.53	29.49695	0.08337	230	235	0.0834
240.00	7.39	29.57879	0.08184	235	240	0.0818
245.00	7.26	29.65917	0.08038	240	245	0.0804
250.00	7.14	29.73813	0.07896	245	250	0.0790
255.00	7.02	29.81573	0.0776	250	255	0.0776

Método de bloque alterno			Periodo de retorno		50	
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
260.00	6.90	29.89202	0.07629	255	260	0.0763
265.00	6.78	29.96705	0.07503	260	265	0.0750
270.00	6.68	30.04086	0.07381	265	270	0.0738
275.00	6.57	30.11349	0.07263	270	275	0.0726
280.00	6.47	30.18498	0.07149	275	280	0.0715
285.00	6.37	30.25537	0.07039	280	285	0.0704
290.00	6.27	30.32470	0.06933	285	290	0.0693
295.00	6.18	30.39300	0.0683	290	295	0.0683
300.00	6.09	30.46030	0.0673	295	300	0.0673

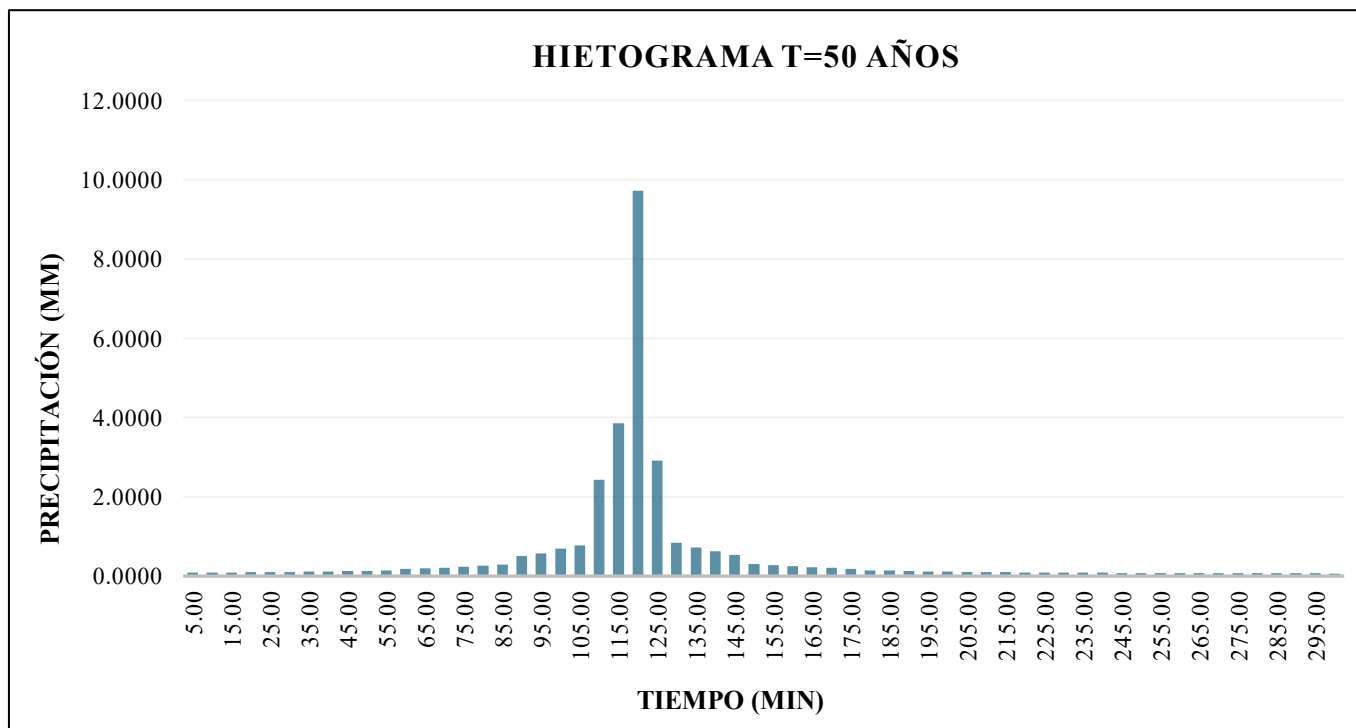


Fig. 18 Hietograma T = 50.

C. FASE III: SIMULACIÓN EN HEC - HMS

En esta fase se realizaron las simulaciones hidrológicas en HEC-HMS para los escenarios de 2014 y 2022, empleando los parámetros calculados previamente (CN, Tc y hietogramas de diseño). Una vez ejecutados los modelos, se obtuvieron los hidrogramas de escorrentía superficial y los valores de caudal pico, volumen generado y tiempo al pico para cada subcuenca (ver figura 19). Los resultados fueron organizados en tablas comparativas y gráficos superpuestos que muestran de forma clara cómo la urbanización incrementó la escorrentía y aceleró la respuesta hidrológica en 2022. Además, se elaboraron mapas temáticos y diagramas que permiten visualizar las diferencias espaciales entre ambos años, y se expusieron los caudales de diseño calculados para cada escenario, resaltando las variaciones producidas por el cambio de uso del suelo en la zona urbana de Ambato. [6]

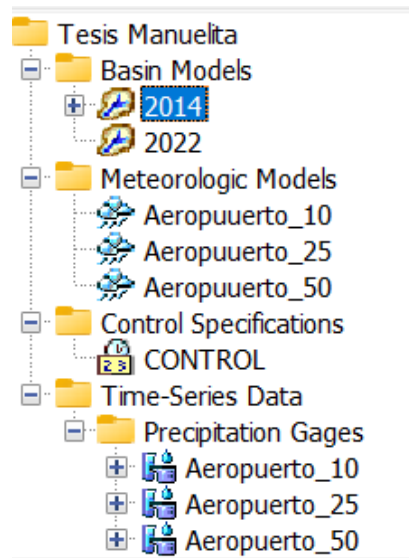


Fig. 19 Estructura del proyecto en HEC - HMS.

La Fig. 19 muestra la estructura general del proyecto configurado en HEC-HMS, donde se organizaron los componentes necesarios para la simulación hidrológica. En la sección *Basin Models* se incluyen los dos escenarios analizados: **2014** y **2022**, cada uno con sus respectivas características de cuenca y parámetros hidrológicos. En *Meteorologic Models* se incorporaron los hietogramas generados a partir de las curvas IDF de la estación **Aeropuerto Ambato**, definidos para los periodos de retorno de **10, 25 y 50 años**, los cuales alimentan cada simulación. Dentro de *Control Specifications* se estableció el intervalo de tiempo y la duración total de las simulaciones. Finalmente, en *Time-Series Data* se registraron las series

de precipitación correspondientes a cada periodo de retorno, asociadas a los pluviómetros configurados en *Precipitation Gages*. Esta estructura permitió integrar de forma ordenada los modelos de cuenca, los escenarios climáticos y las entradas de precipitación necesarias para obtener los hidrogramas de esorrentía y los caudales de diseño.

Se obtuvieron los siguientes resultados de acuerdo con la modelación para los años 2014 y 2022:

1) *Simulación para 2014*

La figura 20 corresponde a la ventana Basin Model de HEC-HMS para el escenario del año 2014. En ella se observa la representación espacial de una subcuenca denominada *Subcuenca14* (en color verde), dentro de la cual se muestra claramente el trazado del cauce principal marcado con una línea azul gruesa que sigue la dirección del flujo desde la parte baja hacia el punto de salida. En la parte superior derecha aparece el punto de salida o “Outlet”, identificado como *Aforo14*, que actúa como nodo final donde se concentrará la esorrentía generada en toda la subcuenca. La diagonal que conecta la subcuenca con el aforo representa la relación hidrológica entre el área aportante y el punto de control.

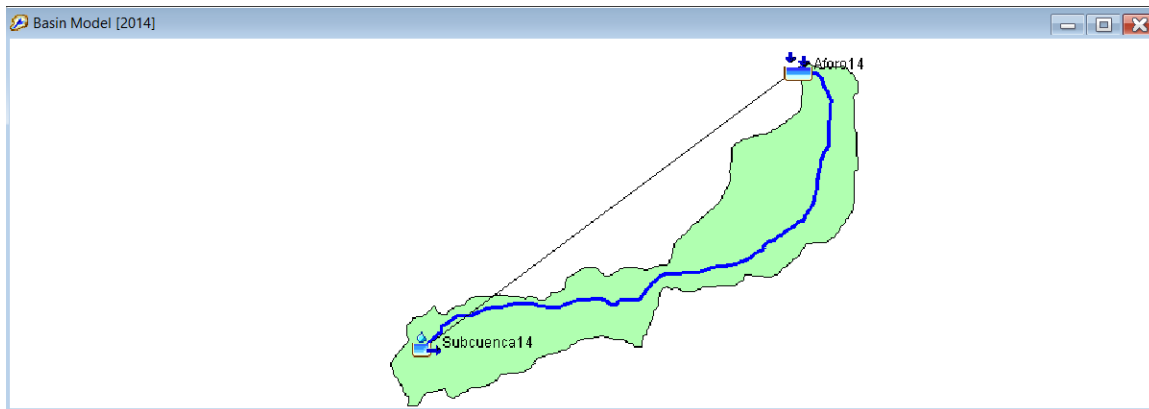


Fig. 20 Simulación para 2014.

a) Valores del HEC-HMS de acuerdo con los periodos de retorno para 2014

T= 10 años

Como se indica en la Fig. 21 el modelo generó un caudal pico (Peak Discharge) de 3,1 m³/s, ocurrido a las 02:20 del evento simulado. El volumen total de precipitación aplicado fue de 23,40 mm, del cual 19,89 mm correspondieron a pérdidas por infiltración y otros

procesos, mientras que 3,50 mm representaron el volumen excedente disponible para escorrentía. De este excedente, el volumen de escorrentía directa (Direct Runoff Volume) y el volumen total descargado en el punto de salida alcanzó 3,41 mm, confirmando que la subcuenca no generó flujo base durante este evento (Baseflow Volume = 0,00 mm

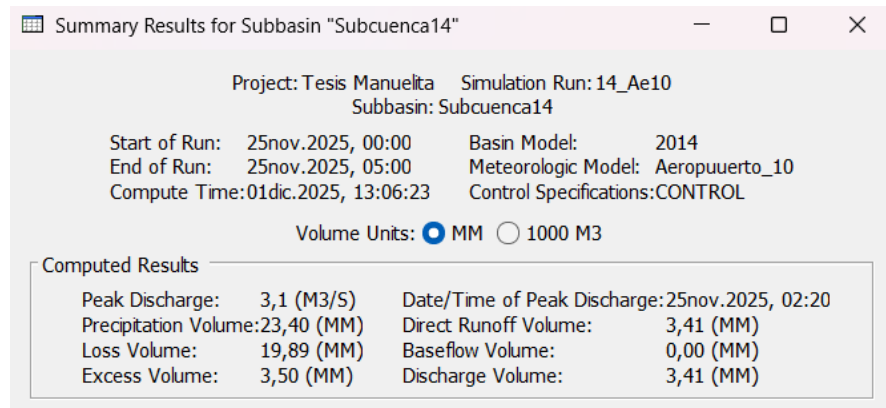


Fig. 21 Resultados de la subcuenca $T=10$.

De acuerdo con la fig 22 en la parte superior se representa la precipitación aplicada, donde las barras rojas corresponden al total de lluvia del evento, mientras que las barras azules indican el exceso de precipitación disponible para generar escorrentía tras descontar las pérdidas iniciales y continuas. El evento principal se concentra alrededor de las 02:00, momento en que se alcanza la mayor intensidad de lluvia. En el gráfico inferior se observa la generación de escorrentía; la curva azul muestra el hidrograma de salida (Outflow) de la subcuenca, cuyo caudal comienza a incrementarse inmediatamente después del inicio del evento de lluvia. Se identifica un caudal pico cercano a los $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente a las 02:20, lo que refleja una respuesta rápida típica de zonas urbanizadas, seguida de una recesión progresiva que se estabiliza entre las 04:00 y 05:00. Por su parte, la línea segmentada roja representa el flujo base (Baseflow), el cual se mantiene en $0,00 \text{ m}^3/\text{s}$ durante todo el evento, indicando ausencia de aporte subterráneo. En conjunto, el comportamiento hidrológico mostrado evidencia una respuesta dominada por escorrentía directa y tiempos de respuesta cortos, características propias de cuencas con alta impermeabilización y rápida concentración del flujo superficial

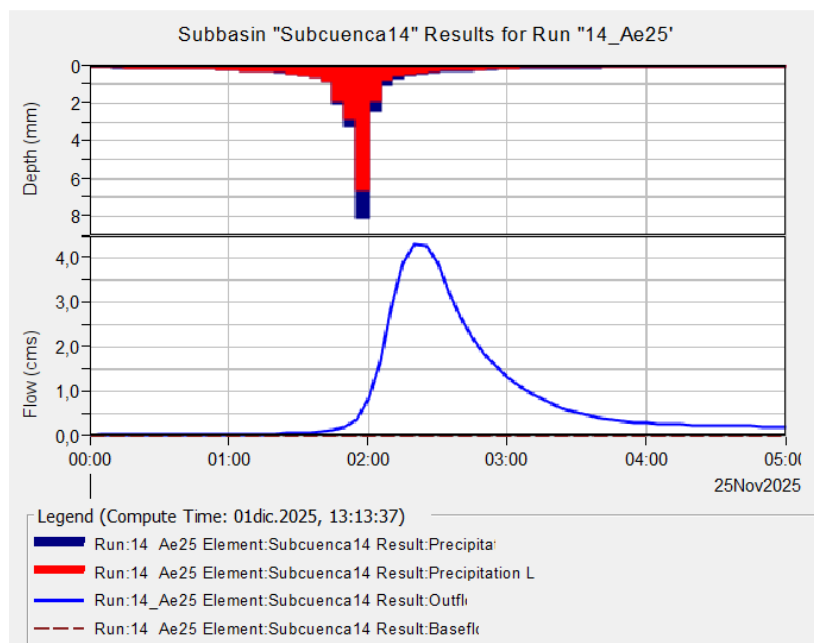


Fig. 22 Comportamiento de la subcuenca $T=10$.

T=25 años

Como se indica en la fig. 23, el modelo generó un caudal pico (Peak Discharge) de 4,3 m³/s, ocurrido a las 02:20 del evento simulado. El volumen total de precipitación aplicado fue de 26,96 mm, del cual 22,42 mm correspondieron a pérdidas por infiltración y otros procesos, mientras que 4,55 mm representaron el volumen excedente disponible para escorrentía. De este excedente, el volumen de escorrentía directa (Direct Runoff Volume) y el volumen total descargado en el punto de salida alcanzaron 4,44 mm, confirmando que la subcuenca no generó flujo base durante el evento (0,00 mm) y que prácticamente la totalidad del volumen excedente se transformó en escorrentía superficial

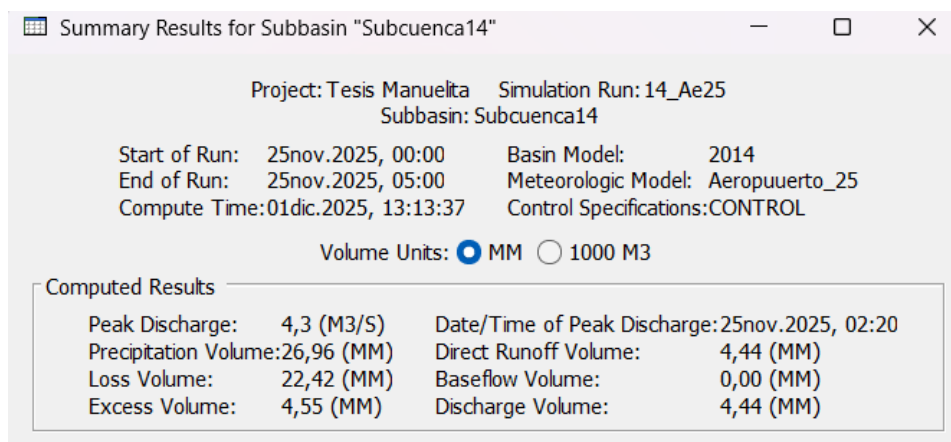


Fig. 23 Resultados de la subcuenca $T=25$.

De acuerdo con la fig 24 en la parte superior se presenta la precipitación aplicada, donde las barras rojas representan la lluvia total del evento, mientras que las barras azules corresponden a la precipitación excedente, es decir, el volumen que no fue infiltrado y que queda disponible para generar escorrentía. El evento principal ocurre alrededor de las 02:00, momento en el cual se concentra la mayor intensidad del hietograma. En el gráfico inferior se muestra la generación de escorrentía; la curva azul refleja el hidrograma de salida

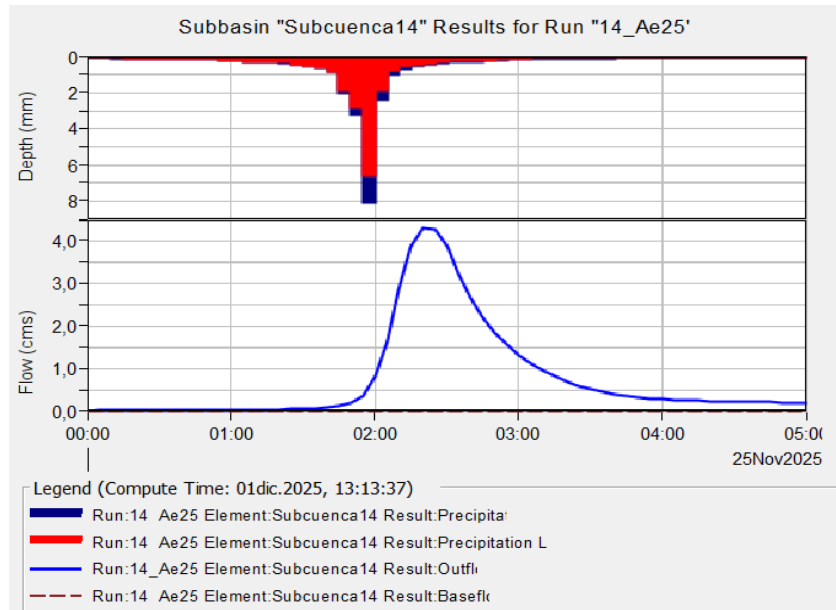


Fig. 24 Comportamiento de la subcuenca $T=25$.

(Outflow) producido por la subcuenca, cuyo caudal comienza a incrementarse inmediatamente después del periodo de mayor intensidad de lluvia. Se registra un caudal pico aproximado de $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$ alrededor de las 02:20, lo que evidencia una respuesta rápida típica en cuencas con superficies parcialmente impermeables. Posteriormente, la recesión del hidrograma disminuye gradualmente hasta estabilizarse entre las 04:00 y 05:00, siguiendo un comportamiento de drenaje eficiente. Respecto al flujo base, la línea segmentada permaneció constante en $0,00 \text{ m}^3/\text{s}$, indicando ausencia de aporte subterráneo durante todo el evento simulado. En conjunto, el comportamiento hidrológico observado revela una elevada producción de escorrentía directa y un tiempo de concentración relativamente corto, lo cual es característico de cuencas con presencia de áreas urbanizadas o con baja capacidad de infiltración, donde la concentración del flujo ocurre rápidamente y el caudal pico se alcanza pocos minutos después del evento de lluvia.

T= 50 años

De acuerdo con la fig,25 el modelo generó un caudal pico (Peak Discharge) de 5,6 m³/s, ocurrido a las 02:20 del evento simulado 5. El volumen total de precipitación aplicado fue de 30,46 mm, de los cuales 24,78 mm correspondieron a pérdidas por infiltración y otros procesos, mientras que 5,68 mm representaron el volumen excedente disponible para escorrentía. De este excedente, el volumen de escorrentía directa (Direct Runoff Volume) y el volumen total descargado en el punto de salida alcanzaron 5,54 mm, lo que confirma que la subcuenca no generó flujo base durante el evento (0,00mm) y que prácticamente la totalidad del volumen excedente se transformó en escorrentía superficial.

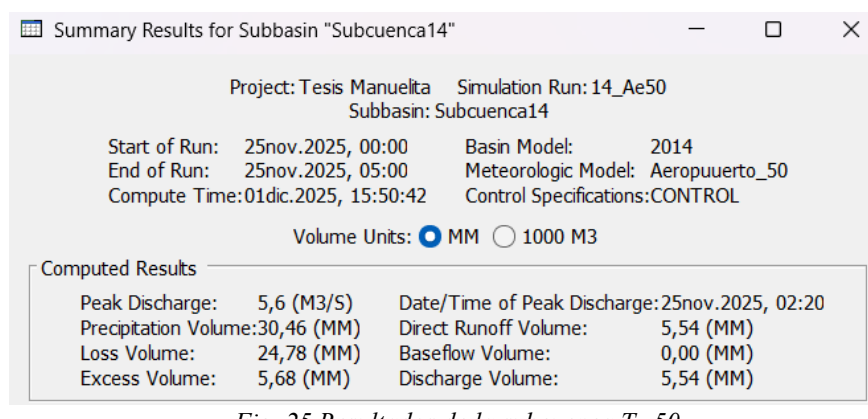


Fig. 25 Resultados de la subcuenca T=50.

De acuerdo con la fig 26 en la parte superior se muestra la precipitación aplicada durante el evento, donde las barras rojas representan la lluvia total registrada, mientras que las barras azules indican la precipitación excedente que no fue infiltrada y quedó disponible para generar escorrentía. El evento principal ocurre alrededor de las 02:00, momento en que se concentra la mayor intensidad del hietograma. En cuanto al gráfico inferior, la curva azul corresponde al hidrograma de salida (Outflow) generado por la subcuenca, observándose un incremento del caudal inmediatamente después del periodo de mayor intensidad de lluvia. Se alcanza un caudal pico cercano a los 5,6 m³/s aproximadamente a las 02:20, evidenciando una respuesta rápida típica de cuencas con superficies parcialmente impermeables, seguida de una recesión progresiva que se estabiliza entre las 04:00 y 05:00, reflejando un drenaje eficiente. Respecto al flujo base, la línea segmentada se mantiene constante en 0,00 m³/s, lo que indica que no existió aporte subterráneo durante el evento simulado. En conjunto, el comportamiento hidrológico evidencia que la respuesta está dominada por la escorrentía

directa y un tiempo de concentración corto, característico de subcuencas urbanizadas o compactadas, donde la concentración del flujo es rápida y el caudal pico se alcanza pocos minutos después del máximo de precipitación.

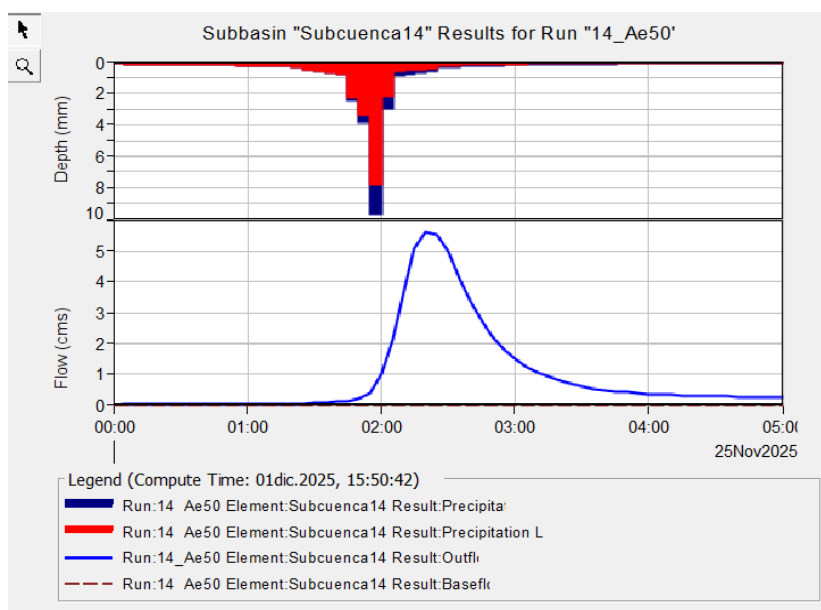


Fig. 26 Comportamiento de la subcuenca $T=50$.

2) Simulación para 2022:

La Fig. 27 corresponde a la ventana Basin Model de HEC-HMS para el escenario del año 2022. En ella se observa la representación espacial de la subcuenca denominada Subcuenca22 (en color amarillo), dentro de la cual se muestra claramente el trazado del cauce principal, marcado con una línea magenta gruesa que sigue la dirección del flujo a lo largo del relieve desde la parte baja hacia el punto de salida. En la parte superior derecha se ubica el punto de descarga o "Outlet", identificado como Aforo22, que funciona como el nodo final donde se concentrará la escorrentía generada en toda la subcuenca. La línea diagonal que conecta la

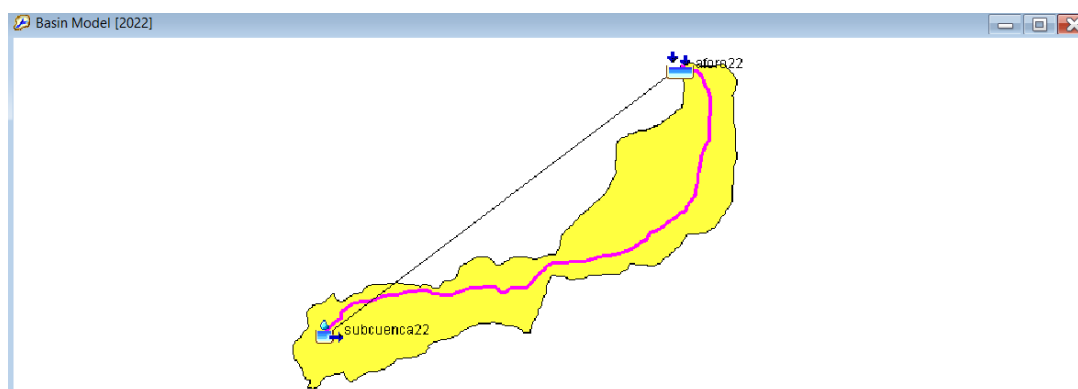


Fig. 27 Simulación para 2022.

subcuenca con el aforo representa la relación hidrológica entre el área aportante y el punto de control dentro del modelo para este escenario.

a) Valores del HEC-HMS de acuerdo con los periodos de retorno para 2022

T=10 años

De acuerdo con la fig 28, el modelo generó un caudal pico (Peak Discharge) de 3,5 m³/s, ocurrido a las 02:20 del evento simulado. El volumen total de precipitación aplicado fue de 23,40 mm, de los cuales 19,43 mm correspondieron a pérdidas por infiltración y otros procesos, mientras que 3,97 mm representaron el volumen excedente disponible para escorrentía. De este excedente, el volumen de escorrentía directa (Direct Runoff Volume) y el volumen total descargado en el punto de salida alcanzaron 3,86 mm, lo que confirma que la subcuenca no generó flujo base durante el evento (0,00 mm) y que prácticamente la totalidad del volumen excedente se transformó en escorrentía superficial

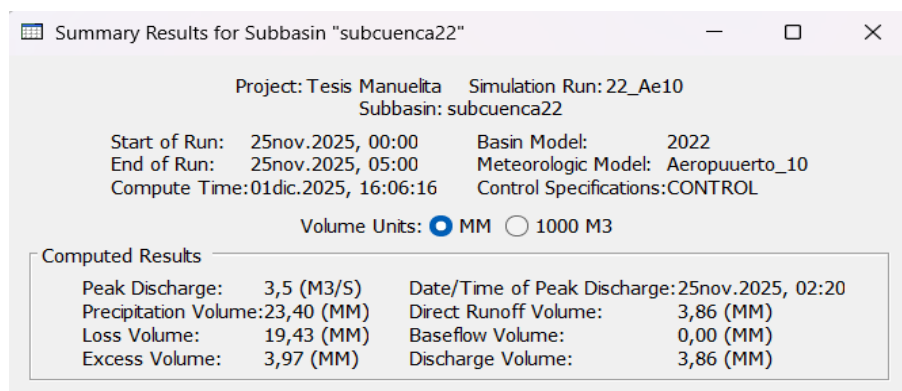


Fig. 28 Resultados de la subcuenca T=10.

De acuerdo con la fig.29 en la parte superior se representa la precipitación aplicada durante el evento, con barras rojas que muestran la lluvia total registrada entre las 00:00 y las 05:00, mientras que las barras azules reflejan la precipitación excedente que no fue infiltrada y que quedó disponible para generar escorrentía. El evento principal se concentra alrededor de las 02:00, donde se observa una mayor intensidad y profundidad en el bloque de lluvia del hietograma. En el gráfico inferior se presenta la generación de escorrentía, donde la curva azul corresponde al hidrograma de salida (Outflow) de la subcuenca; el caudal comienza a incrementarse inmediatamente después del periodo de máxima intensidad de precipitación, evidenciando una respuesta hidrológica rápida. El caudal pico alcanza un valor aproximado

de 3,5 m³/s hacia las 02:20, lo que coincide con el tiempo de respuesta esperado según los resultados del modelo. Posteriormente, la recesión del hidrograma disminuye gradualmente hasta estabilizarse entre las 04:00 y 05:00, lo que demuestra un comportamiento de drenaje eficiente y sin aportes prolongados. Además, la línea segmentada asociada al flujo base (Baseflow) permanece fija en 0,00 m³/s, indicando la ausencia de aporte subterráneo y que la escorrentía generada corresponde únicamente a flujo directo. En conjunto, el comportamiento hidrológico mostrado evidencia una respuesta totalmente dominada por escorrentía directa, con un tiempo de concentración corto, característico de subcuencas urbanizadas, compactadas o con baja infiltración. La forma del hidrograma confirma que el caudal pico se alcanza pocos minutos después del máximo de precipitación, validando la coherencia del modelo con las condiciones físicas del área aportante.

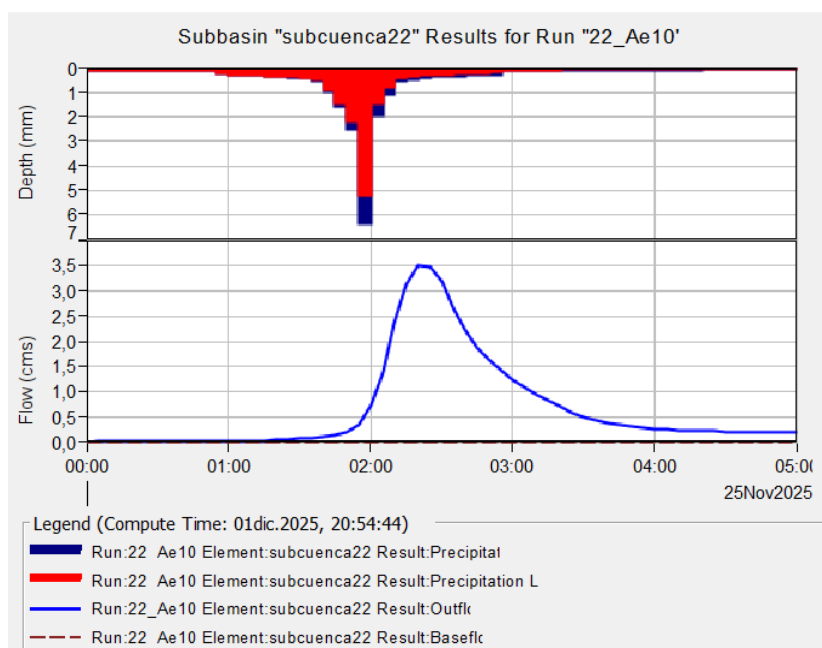


Fig. 29 Comportamiento de la subcuenca $T=10$.

T=25 años

De acuerdo con la fig 30, el modelo generó un caudal pico (Peak Discharge) de 4,9 m³/s, ocurrido a las 02:20 del evento simulado. El volumen total de precipitación aplicado fue de 26,96 mm, de los cuales 21,83 mm correspondieron a pérdidas por infiltración y otros procesos, mientras que 5,14 mm representaron el volumen excedente disponible para escorrentía. De este excedente, el volumen de escorrentía directa (Direct Runoff Volume) y

el volumen total descargado en el punto de salida alcanzaron 5,02 mm, lo que confirma que la subcuenca no generó flujo base durante el evento (0,00 mm) y que prácticamente la totalidad del volumen excedente se transformó en escorrentía superficial.

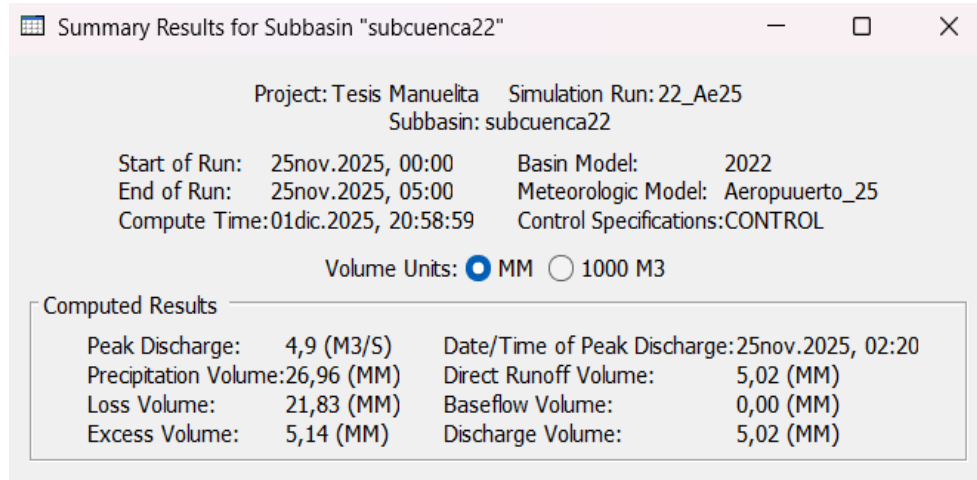


Fig. 30 Resultados de la subcuenca T=25.

De acuerdo con la fig31 en la parte superior se muestra la precipitación aplicada durante el evento, donde las barras rojas representan la lluvia total registrada, distribuida principalmente entre las 01:40 y las 02:10, mientras que las barras azules reflejan la precipitación excedente que no fue infiltrada y permaneció disponible para generar escorrentía superficial. El evento principal ocurre alrededor de las 02:00, cuando se concentra la mayor intensidad del hietograma, con un bloque de lluvia que alcanza su máxima profundidad en ese intervalo. En el gráfico inferior se observa la generación de escorrentía, representada mediante la curva azul del hidrograma de salida (Outflow) de la subcuenca; el caudal comienza a incrementarse de manera inmediata tras el periodo de mayor intensidad de precipitación, lo que evidencia una respuesta hidrológica rápida. El caudal pico se aproxima a 4,9 m³/s hacia las 02:20, en concordancia con los resultados numéricos obtenidos en la simulación. Posteriormente, la fase de recesión se desarrolla de forma progresiva y continua hasta estabilizarse entre las 04:00 y 05:00, indicando un drenaje eficiente y una baja capacidad de almacenamiento en la subcuenca. Paralelamente, la línea segmentada asociada al flujo base se mantiene fija en 0,00 m³/s, lo que confirma la ausencia de aporte subterráneo y que toda la escorrentía generada corresponde exclusivamente al flujo superficial directo. En conjunto, el comportamiento general evidencia una dinámica hidrológica dominada por la escorrentía directa y un tiempo de concentración corto, característico de subcuencas

urbanizadas, compactadas o con baja infiltración. La forma del hidrograma confirma que la concentración del flujo es rápida y que el caudal pico se alcanza pocos minutos después del máximo de precipitación, reflejando una respuesta altamente sensible frente a eventos de lluvia intensa y de corta duración.

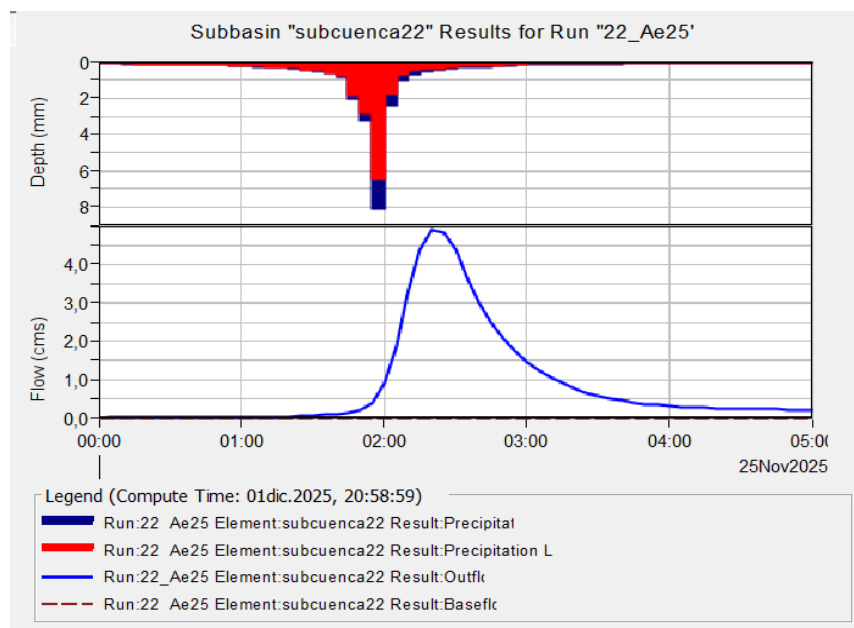


Fig. 31 Comportamiento de la subcuenca $T=25$.

T=50 años

De acuerdo con la fig 32, el modelo generó un caudal pico (Peak Discharge) de $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$, ocurrido a las 02:20 del evento simulado. El volumen total de precipitación aplicado fue de 30,46 mm, de los cuales 24,06 mm correspondieron a pérdidas por infiltración y otros procesos, mientras que 6,40 mm representaron el volumen excedente disponible para escorrentía. De este excedente, el volumen de escorrentía directa (Direct Runoff Volume) y el volumen total descargado en el punto de salida alcanzaron 6,24 mm, lo que confirma que la subcuenca no generó flujo base durante el evento (0,00 mm) y que prácticamente la totalidad del volumen excedente se transformó en escorrentía superficial.

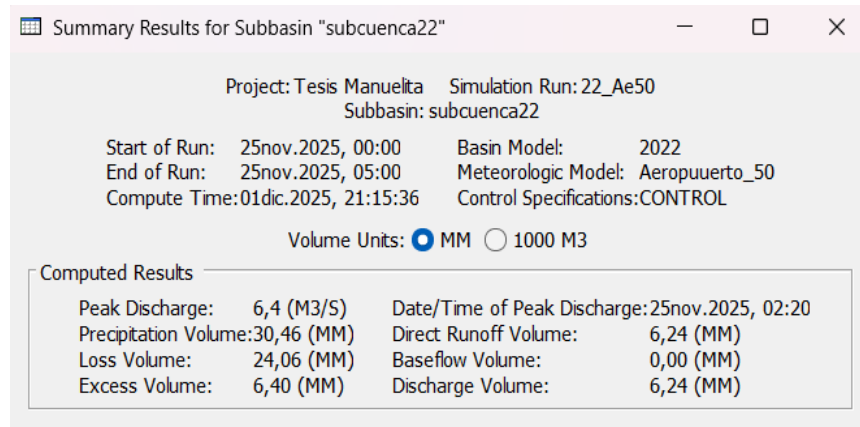


Fig. 32 Resultados de la subcuenca $T=50$.

De acuerdo con la fig. 33 la parte superior se presenta la precipitación aplicada durante el evento, donde las barras rojas representan la lluvia total registrada y muestran un bloque principal de mayor intensidad concentrado entre las 01:50 y las 02:10. Las barras azules corresponden a la precipitación excedente, es decir, el volumen que no fue infiltrado y quedó disponible para generar escorrentía superficial, observándose un incremento de este excedente durante el periodo de mayor intensidad. El evento principal ocurre alrededor de las 02:00, instante en el que el hietograma alcanza su mayor profundidad y se refleja la intensidad máxima del evento. En el gráfico inferior se representa la generación de escorrentía mediante la curva azul del hidrograma de salida (Outflow), donde el caudal comienza a aumentar inmediatamente después del punto de máxima precipitación, evidenciando una respuesta hidrológica rápida y consistente. El caudal pico alcanza un valor cercano a $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente a las 02:20, lo cual es característico de una subcuenca con baja infiltración y alta sensibilidad frente a lluvias intensas. La fase de recesión se desarrolla de manera progresiva hasta estabilizarse entre las 04:00 y las 05:00, lo que corresponde a un drenaje eficiente y un bajo almacenamiento superficial. Asimismo, la línea segmentada asociada al flujo base (Baseflow) se mantiene constante en $0,00 \text{ m}^3/\text{s}$, indicando la ausencia total de aporte subterráneo durante el evento simulado. En conjunto, el comportamiento general evidencia una respuesta hidrológica dominada por la escorrentía directa y un tiempo de concentración corto, típico de subcuencas urbanizadas, compactadas o con baja capacidad de infiltración. La forma del hidrograma confirma un sistema altamente reactivo, donde la concentración del flujo se da rápidamente y el caudal pico se alcanza pocos minutos después del máximo de precipitación.

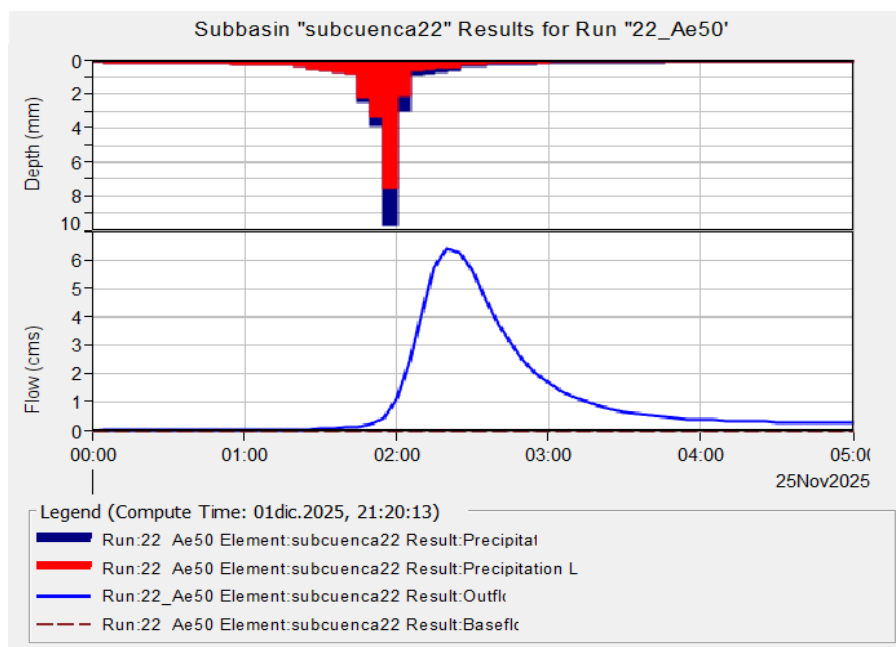


Fig. 33 Comportamiento de la subcuenca $T=50$.

3) RESUMEN DE RESULTADOS

TABLA XIII

RESUMEN DE RESULTADOS

Periodo de retorno (años)	Qp_2014 (m ³ /s)	Qp_2022 (m ³ /s)	Δ Qp (%)	Precipitación 2014 (mm)	Precipitación 2022 (mm)	ΔV (%)
10	3.1	3.5	12.90%	23.4	23.4	0%
25	4.3	4.9	13.95%	26.96	26.96	0%
50	5.6	6.4	14.29%	30.46	30.46	0%

El caudal pico aumenta en todos los periodos de retorno entre 2014 y 2022, con incrementos del orden de **13–14 %**

El incremento relativo crece ligeramente con el periodo de retorno:

- $T = 10$ años $\rightarrow +12.9 \%$
- $T = 25$ años $\rightarrow +13.95 \%$
- $T = 50$ años $\rightarrow +14.29 \%$

Esto indica que los eventos más extremos son más sensibles al cambio de uso del suelo, generando aumentos de pico un poco mayores.

Desde el punto de vista hidráulico, un incremento de $\approx 13\text{--}14\%$ en Q_p puede implicar:

- Mayor exigencia para alcantarillas, puentes y sistemas de drenaje existentes.
- Mayor probabilidad de desbordamientos y anegamientos locales, especialmente en las zonas bajas de la cuenca.

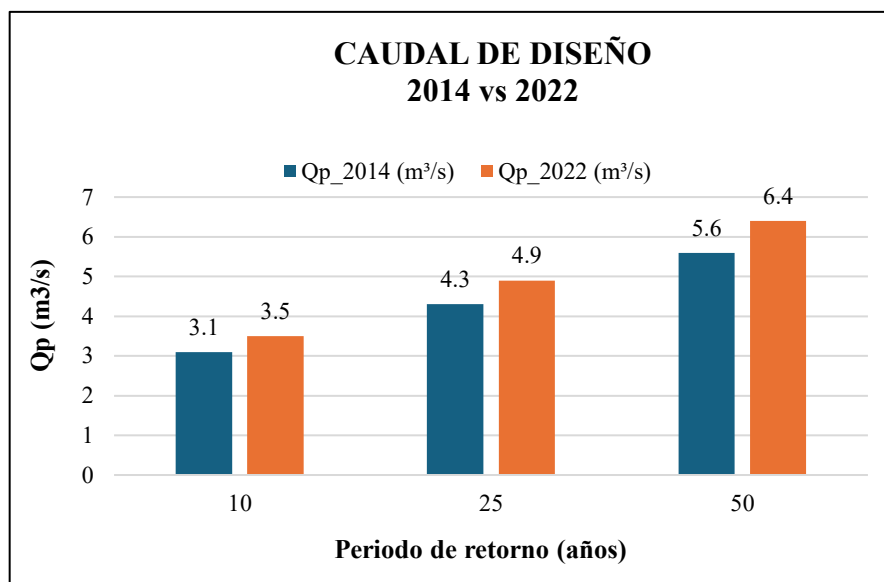


Fig. 34 Caudal de diseño 2014 vs 2022.

- El volumen total de la precipitación no cambia entre 2014 y 2022 para ninguno de los periodos de retorno ($\Delta V = 0\%$). Esto significa que la cantidad total de agua generada por el evento es prácticamente la misma, pero en 2022 esa agua se concentra en menos tiempo, lo que produce caudales picos más altos y una respuesta más rápida de la cuenca

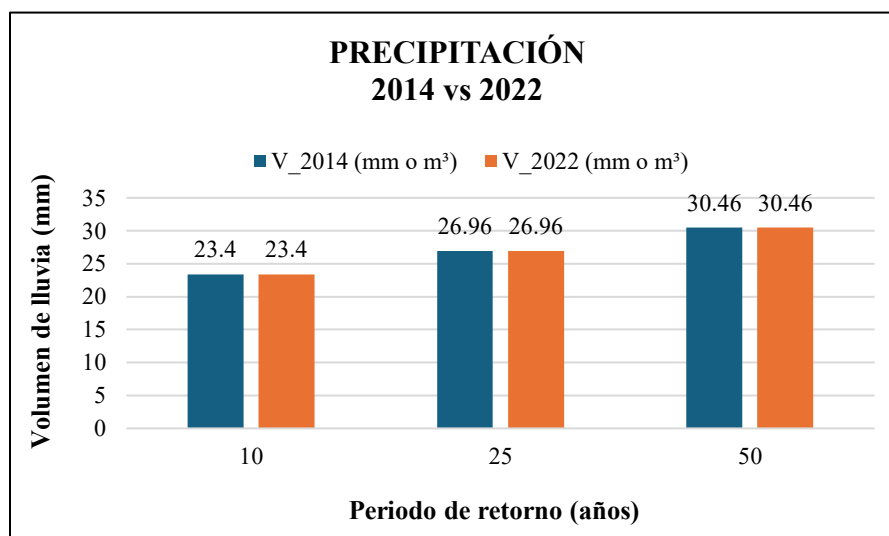


Fig. 35 Volumen de lluvia 2014 vs 2022.

INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL:

TABLA XIV

RESUMEN DE INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Periodo de retorno (años)	Loss_2014 (mm)	Loss_2014 (mm)	Δ Loss (%)	Excess_2014 (mm)	Excess_2022 (mm)	ΔV (%)
10	19.89	19.43	-2.31%	3.5	3.97	13.43%
25	22.42	21.83	-2.63%	4.55	5.14	12.97%
50	24.78	24.06	-2.91%	5.68	6.4	12.68%

Las pérdidas iniciales de infiltración disminuyen sistemáticamente de 2014 a 2022 para todos los periodos de retorno (entre -2.3 y -2.9 %).

La magnitud de la reducción aumenta ligeramente con T:

- T=10 años: -2.31 %
- T=25 años: -2.63 %
- T=50.años: -2.91%

Esto sugiere que, bajo lluvias más intensas, la diferencia en la capacidad de infiltración/almacenamiento entre 2014 y 2022 se vuelve un poco más marcada.

En términos físicos, esto es consistente con:

- 1) Mayor impermeabilización (más pavimento, techos, vías, etc.).
- 2) Disminución de áreas verdes o agrícolas, lo que reduce la capacidad de infiltración y almacenamiento superficial/interceptación.

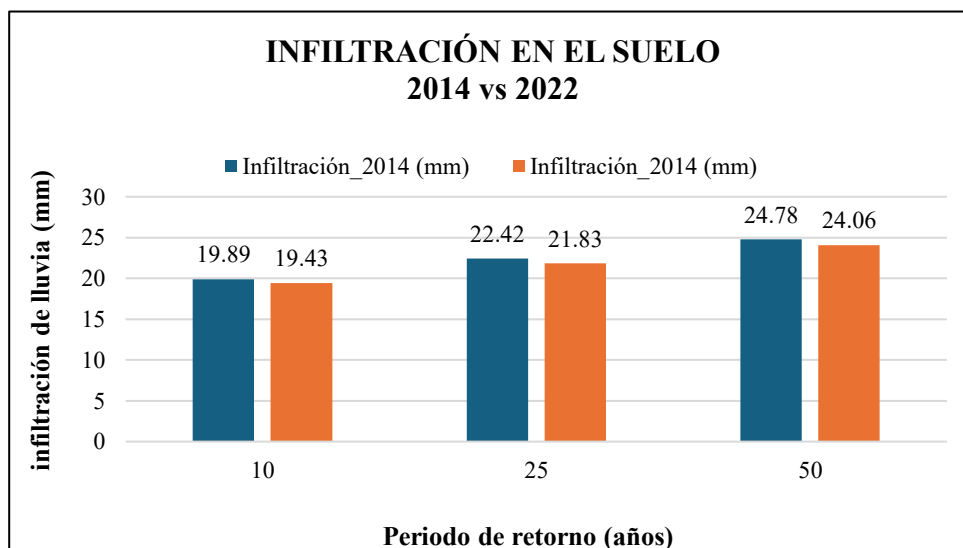


Fig. 36 Infiltración en el suelo 2014 vs 2022.

El exceso de lluvia (lluvia efectiva) aumenta en 2022 para todos los periodos de retorno:

- T=10: +0.47 mm
- T=25: +0.59 mm
- T=50: +0.72, mm

Es decir, en términos absolutos, a mayor periodo de retorno, mayor aumento de exceso.

El incremento relativo es casi constante, alrededor del 13 % en todos los casos. Esto indica que el cambio de uso del suelo ha generado un patrón bastante uniforme de aumento de escorrentía efectiva, independientemente de la intensidad del evento

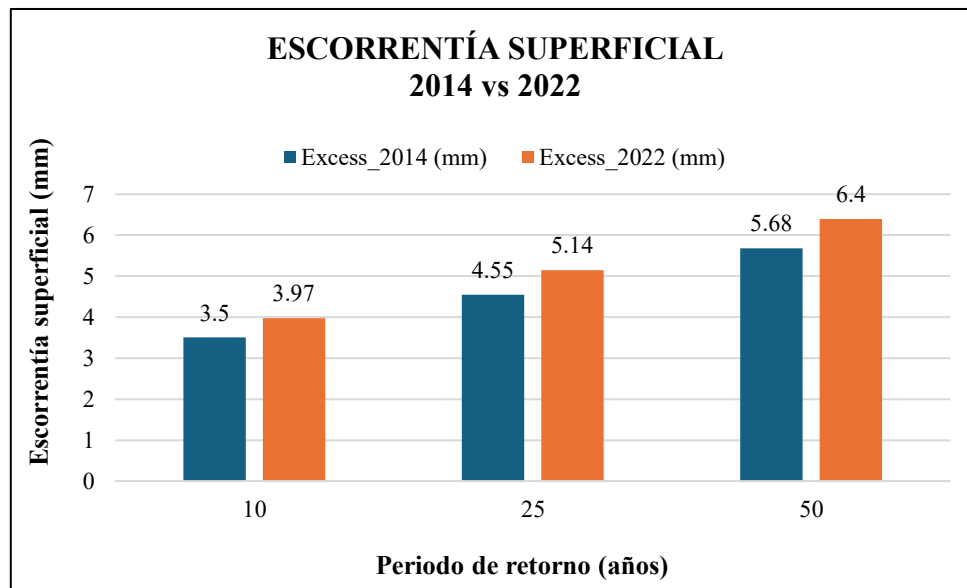


Fig. 37 Escorrentía Superficial 2014 vs 2022.

II. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

RESUMEN DE RESULTADOS:

- Se observa un incremento progresivo de los caudales pico entre 2014 y 2022, del orden de 12,9 % a 14,3 % para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Este aumento está asociado a una mayor lluvia efectiva, que crece aproximadamente un 13 % entre ambos años (de 3,5 a 3,97 mm; de 4,55 a 5,14 mm; y de 5,68 a 6,40 mm), mientras que las pérdidas disminuyen entre 2,3 % y 2,9 %. En conjunto, estos

resultados son coherentes con un incremento del CN y de la impermeabilización producto de la expansión urbana entre 2014 y 2022.

- Aunque el volumen total del evento se mantiene prácticamente constante ($\Delta V = 0 \%$ en los tres periodos de retorno), el hecho de que con el mismo volumen se obtengan caudales pico mayor indica que una porción más alta de la lluvia se concentra en intervalos de tiempo más cortos. Es decir, la cuenca responde de manera más rápida y más “aguda”, con mayor proporción de escorrentía superficial y menor infiltración, lo que se traduce en mayor carga sobre el sistema de drenaje urbano. Estos resultados confirman que la impermeabilización y la pérdida de cobertura vegetal incrementan significativamente la escorrentía superficial, elevando el riesgo de anegamientos o inundaciones en el ámbito urbano estudiado.
- Los valores de escorrentía efectiva (Excess) muestran un incremento consistente entre 2014 y 2022 para todos los periodos de retorno analizados, pasando de 3.50 a 3.97 mm para T=10 años, de 4.55 a 5.14 mm para T=25 años y de 5.68 a 6.40 mm para T=50 años, lo que representa un aumento promedio de aproximadamente 13 %. Este comportamiento refleja que en 2022 una mayor proporción de la lluvia total se convierte en escorrentía superficial, debido a la reducción de las pérdidas por infiltración y almacenamiento, las cuales disminuyen entre 2,3 % y 2,9 % respecto a 2014. En términos hidrológicos, esto evidencia que la cuenca ha experimentado un proceso de impermeabilización asociado al cambio de uso del suelo, resultando en un incremento significativo de la lluvia efectiva y, por tanto, en una mayor capacidad de generar escorrentía directa durante los eventos de diseño.

Impacto del Cambio de Uso del Suelo en la Escorrentía Superficial: Relación Causa-Efecto e Implicaciones Urbanas

El incremento de áreas impermeables en el tramo suroriental de Ambato, debido a la consolidación de infraestructura urbana, ha generado una reducción progresiva de la infiltración del suelo. Este proceso se refleja en el aumento del Número de Curva (CN) entre los escenarios analizados, pasando de un promedio de 65.65 en 2014 a 68.92 en 2022, evidenciando una disminución de la capacidad de almacenamiento e infiltración del terreno y una mayor propensión al escurrimiento superficial.

Relación Causa-Efecto

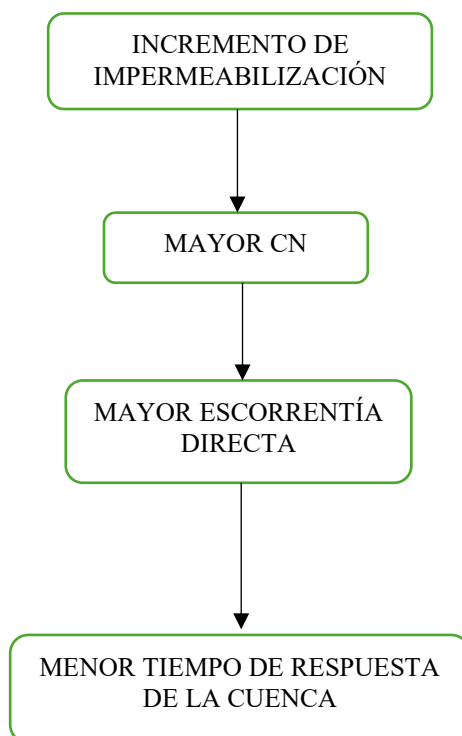


Fig. 38 Relación Causa - Efecto.

TABLA XV
EFECTO HIDROLÓGICO CUANTIFICADO

Año	CN promedio	Qp (m³/s)	Variación
2014	65.65	4.3	-
2022	68.92	4.9	+13.95%

$$\Delta Q_p = \frac{4.9 - 4.3}{4.3} \times 100 = 13.95\%$$

Este aumento de casi 14 % en el caudal pico implica que el flujo generado llega con mayor magnitud y en menor tiempo al punto de control, reduciendo la capacidad de atenuación de caudales y generando picos de avenida más severos.

Interpretación clave:

El cambio de uso del suelo influye directamente en el incremento del caudal superficial, intensificando la presión hidráulica sobre la infraestructura existente.

Implicaciones para la Av. Manuelita Sáenz:

El incremento del caudal y del volumen escurrido conlleva efectos que tienen incidencia directa sobre la seguridad vial y la funcionalidad del drenaje urbano:

TABLA XVI
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Implicación	Descripción técnica	Resultado potencial
Saturación o fallo de sumideros	Caudales superiores a la capacidad instalada	Aniegos superficiales durante tormentas intensas
Sobrecarga del sistema de alcantarillado pluvial	Mayor velocidad y volumen del escurrimiento	Desbordamientos y flujos no confinados en calzada
Arrastre de sedimentos y sólidos	Incremento del estrés hidráulico	Taponamiento de rejillas y disminución de eficiencia hidráulica
Afectación a la movilidad segura	Encharcamientos recurrentes	Riesgo de accidentes y deterioro del pavimento
Necesidad de intervención en infraestructura	La red actual responde a un escenario menos impermeable	Urgencia de ampliación o rediseño de drenaje

Síntesis Técnica:

La expansión urbana y el reemplazo de superficies permeables no solo modifican la dinámica hidrológica, sino que incrementan la vulnerabilidad del sector frente a eventos de lluvia:

- Mayor frecuencia de inundaciones puntuales.
- Incremento de los costos de mantenimiento y limpieza.
- Menor vida útil del pavimento.
- Impactos directos sobre la movilidad y seguridad vial.

Aumento del Riesgo Hidráulico por Expansión Urbana y Agrícola en el Sector Suroriental.

Un hallazgo destacable es la particular expansión agrícola del 11 %, a costa de zonas de vegetación nativa y áreas en ladera. A diferencia de patrones clásicos de urbanización —en los que el área agrícola disminuye conforme avanza la consolidación urbana—, este proceso dual de transformación territorial responde a dinámicas socioeconómicas locales: presión por producción alimentaria de proximidad, informalidad en el uso del suelo y disponibilidad de pendientes aptas para cultivos de bajo costo de habilitación. La pérdida progresiva de cobertura natural en laderas elimina zonas con funciones ecológicas esenciales como la

recarga hídrica, la estabilidad de suelos y la atenuación del escurrimiento, lo cual intensifica la generación de caudales rápidos y erosivos [24].

Así, el análisis permite identificar una doble presión sobre la cuenca:

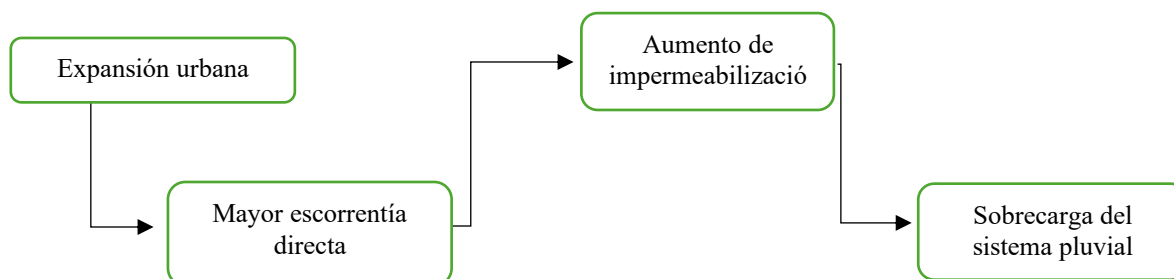


Fig. 39 Análisis de la subcuenca.

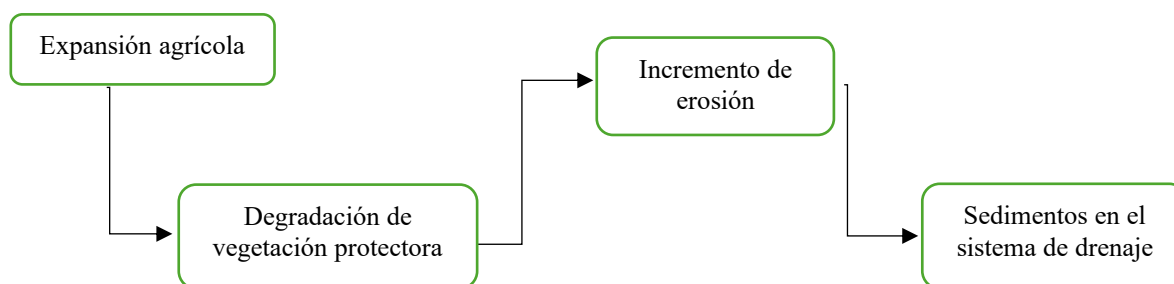


Fig. 40 Análisis de la subcuenca.

Esta combinación amplifica el riesgo hidráulico sobre la Av. Manuelita Sáenz, eje vial estratégico del sector, generando:

- Saturación y fallo de sumideros durante eventos intensos
- Taponamiento por sedimentos y material vegetal arrastrado
- Flujos superficiales no confinados sobre la calzada
- Mayor deterioro del pavimento y riesgo de accidentes
- Incremento de costos de operación y mantenimiento del drenaje urbano

En consecuencia, los resultados no solo evidencian una alteración física del territorio, sino una creciente vulnerabilidad urbana, que deberá ser incorporada en la gestión del drenaje y en la planificación de la expansión futura del sector. Estrategias como infraestructura verde,

control de erosión en laderas y optimización del sistema pluvial actual se vuelven prioritarias para garantizar un desarrollo urbano resiliente.

Implicaciones para la Gestión Territorial y Cumplimiento del PDOT

Del mismo modo, los resultados obtenidos demuestran la importancia de fortalecer la aplicación del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del cantón Ambato, que establece directrices para el control del uso del suelo en zonas ambientalmente sensibles. No obstante, la realidad territorial del tramo suroriental de la ciudad muestra que la expansión urbana incrementó aproximadamente 27 %, mientras que la frontera agrícola también creció en 11 %, principalmente sobre vegetación nativa en laderas, la cual disminuyó en más del 15 % del área original analizada. Estas coberturas naturales desempeñaban un rol crucial en la infiltración y almacenamiento inicial de agua, razón por la cual su pérdida contribuyó al aumento del CN promedio de 65.65 (2014) a 68.92 (2022) y, consecuentemente, al incremento del caudal pico de 4.3 m³/s a 4.9 m³/s, representando un cambio del 13.95 % en la respuesta hidrológica. Este desajuste entre las restricciones territoriales del PDOT y los patrones reales de ocupación del suelo refleja una falta de control en la gestión del crecimiento periurbano, que se traduce en mayores niveles de vulnerabilidad frente a eventos de lluvia y un riesgo más elevado de sobrecarga del sistema de drenaje pluvial en la Av. Manuelita Sáenz. Por ello, se vuelve imprescindible integrar estrategias de protección de laderas, restauración de cobertura vegetal y soluciones basadas en la naturaleza que permitan reducir la escorrentía superficial y garantizar un desarrollo urbano más resiliente y alineado con el marco normativo vigente. [25]

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

- 1) El análisis realizado demostró que el cambio de uso del suelo en la cuenca urbana del río Ambato ha incrementado la impermeabilización, generando mayores valores de escorrentía directa y un aumento del caudal pico, así como una respuesta más rápida ante eventos de lluvia. El uso combinado de HEC-HMS y herramientas SIG permitió cuantificar estos efectos, evidenciando que la urbanización reciente intensifica el riesgo hidrológico en el tramo sur oriental de la ciudad.
- 2) Entre 2014 y 2022 se registraron cambios significativos en la cobertura del territorio: la superficie arbustiva disminuyó **32.48 ha (-29%)**, mientras que el uso agropecuario se incrementó **13.35 ha (+11%)** y el uso antrópico aumentó **19.12 ha (+27%)**, manteniéndose constante el área total en **302.82 ha**. Estos valores cuantifican el proceso de urbanización que ha sustituido coberturas vegetales por superficies asociadas a actividades humanas, generando condiciones más favorables para la generación de escorrentía superficial.
- 3) El incremento de la impermeabilización se refleja en el aumento del **Curve Number (CN)** ponderado, pasando de **65.65 en 2014 a 68.92 en 2022**, debido principalmente a la expansión urbana y la reducción de coberturas con alta infiltración. Además, los hietogramas empleados, derivados de curvas IDF locales, muestran eventos de corta duración y alta intensidad, características que intensifican la respuesta hidrológica. Esta combinación demuestra cómo los cambios en el uso del suelo han reducido la capacidad de almacenamiento e infiltración del terreno, incrementando el volumen de lluvia transformada en escorrentía directa.
- 4) Los resultados de las simulaciones con HEC-HMS demuestran un incremento claro en la magnitud de la escorrentía superficial entre los escenarios evaluados. El modelo hidrológico alcanza caudales picos cercanos a **3.5 m³/s** en simulaciones representativas iniciales, incrementándose a **4.9 m³/s** para eventos con mayor periodo de retorno, y llegando hasta **6.4 m³/s** en escenarios más críticos, todos con **0.00 m³/s** de caudal base. Asimismo, el volumen de escorrentía directa se elevó hasta **6.24 mm**, valor que representa prácticamente la totalidad del volumen excedente generado por

la tormenta simulada, confirmando una respuesta más intensa y rápida que incrementa el riesgo de inundaciones en la Av. Manuelita Sáenz.

II. II. RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda que el GAD Municipal implemente soluciones como pozos de infiltración, áreas de retención temporal y pavimentos permeables en zonas donde el modelo hidrológico identificó mayor sensibilidad al incremento de caudal pico. Estas acciones permitirán reducir el volumen de escorrentía directa y atenuar la respuesta rápida del hidrograma. Además, se sugiere establecer un programa de mantenimiento periódico de la infraestructura existente para asegurar su funcionalidad en eventos de alta intensidad.
- 2) Es necesario que la planificación territorial incorpore límites al aumento de impermeabilidad del suelo en la microcuenca, priorizando la conservación y recuperación de áreas con vegetación arbustiva que históricamente han aportado a la infiltración. Se propone complementar los instrumentos de gestión urbana con indicadores hidrológicos, como variaciones del CN y el impacto sobre el caudal máximo esperado en la Av. Manuelita Sáenz, para que cualquier nueva intervención contemple su efecto sobre el riesgo de inundaciones.
- 3) Se sugiere instalar estaciones de medición de precipitación en sectores estratégicos de la microcuenca para obtener datos de mayor resolución temporal, lo que permitirá calibrar periódicamente los hietogramas y ajustar los valores de CN según los cambios en el uso del suelo. Además, se recomienda actualizar las simulaciones en HEC-HMS cada 3 a 5 años e incluir escenarios futuros de crecimiento urbano para anticipar la magnitud de los caudales pico y gestionar adecuadamente el dimensionamiento del sistema de drenaje.
- 4) Se recomienda que el GAD Municipal de Ambato incorpore soluciones basadas en la naturaleza, como la implementación de corredores verdes y la recuperación de zonas de amortiguamiento hidráulico cerca de los cauces, con el fin de mejorar la infiltración y retardar el escurrimiento superficial. Estas medidas contribuirán a disminuir la velocidad de concentración del flujo y a reducir el riesgo de desbordamientos durante eventos de precipitación intensa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] (L. W. Chow, D. Maidment and L. Mays, *Applied Hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1988) Y (R. H. McCuen, *Hydrologic Analysis and Design*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson

[2] Consejo Nacional de Competencias, *Manual Técnico para el Diseño de Sistemas de Drenaje en Suelos Urbanos*. Quito, Ecuador, 2021.

[3] U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), *National Engineering Handbook*, Section 4: Hydrology, Washington, D.C., 1985.

[4] Ven Te Chow, *Applied Hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill, 1988. (Si deseas puedo reemplazar por autor ecuatoriano)

[5] (J. V. Chow, “Rainfall distribution for design storms,” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 86, no. 2, pp. 1–20, 1960.

[6] Hydrologic Engineering Center (HEC), *HEC-HMS User’s Manual*. Davis, USA: USACE, 2020.

[7] Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua, *Sistema de Información Geográfica y Cartografía Base Provincial*. Ambato, Ecuador, 2023.

[8] Instituto Geográfico Militar (IGM), *Cartografía del Ecuador y delimitación de microcuencas urbanas*. Quito, Ecuador, 2023.

[9] GAD Municipalidad de Ambato, *Plan de uso y gestión del suelo del cantón Ambato 2033*. Ambato, Ecuador, 2021.

[10] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), *Anuario Hidrometeorológico del Ecuador*. Quito, Ecuador, 2024.

[11] L. H. Carvajal Aldás, *Análisis multitemporal de la expansión urbana y cambios en el uso del suelo entre los años 2004–2021 de la ciudad de Ambato*, Tesis de grado, 2022.

[12] Universidad Técnica Particular de Loja, *Cambio de uso de suelo en la ciudad de Ambato y planificación de crecimiento urbano*, Tesis de maestría, UTPL, Loja, Ecuador, 2024. Data UTPL

[13] J. B. Mestanza-Orellana and F. Castro, “Análisis hidrológico e hidráulico para la identificación de zonas de inundaciones en el área urbana del cantón Ambato e integrar estrategias de mitigación,” *Yachasun*, 2025. Yachasun+1

[14] C. Prehn, “Simulación precipitación–escorrentía en la subcuenca del río Chiquiurcu con HEC-HMS,” *Dominio de las Ciencias*, 2023. Dominio de las Ciencias

[15] F. C. Solórzano “Atenuadores de escorrentía para la quebrada Cañitas, Ambato, Ecuador,” *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, 2023. Ciencia Latina

[16] P. Duque-Sarango, D. M. Patiño, and X. E. López, “Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical,” *Información Tecnológica*, vol. 30, no. 6, pp. 351–362, 2019. SciELO

[17] K. D. Farinango Farinango, *Influencia del cambio de uso del suelo en la regulación hídrica en la cuenca del río Guayabal*, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2025. DSpace UCE

[18] C. A. Maldonado Chávez, *Estudio hidrológico de cuencas pareadas mediante métodos de teledetección y modelación matemática*, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2024. dspace.unach.edu.ec

[19] A. Y. Oñate Paladines, *Aplicación del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Zarumilla para la simulación de caudales bajo escenarios de cambio de uso del suelo*, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, 2017. dspace.utpl.edu.ec

[20] P. Crespo et al., “Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos,” in *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*, F. Cuesta et al., Eds. Quito, Ecuador: CONDESAN, 2014. ResearchGate

[21] T. Palacios-Cabrera, J. Valdés-Abellán, A. Jódar-Abellán, and R. Alulema, “Use of the HEC-HMS model for the evaluation of land use change and surface runoff,” in *VII International Congress Application, Transport and Storage of Fluids in Industrial, Hydrocarbon and Environmental Processes (ICATS 2020)*, Riobamba, Ecuador, Oct. 2020. ResearchGate

[22] P. G. Ramírez, “Modelos de escorrentía superficial en la última década,” *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, 2023

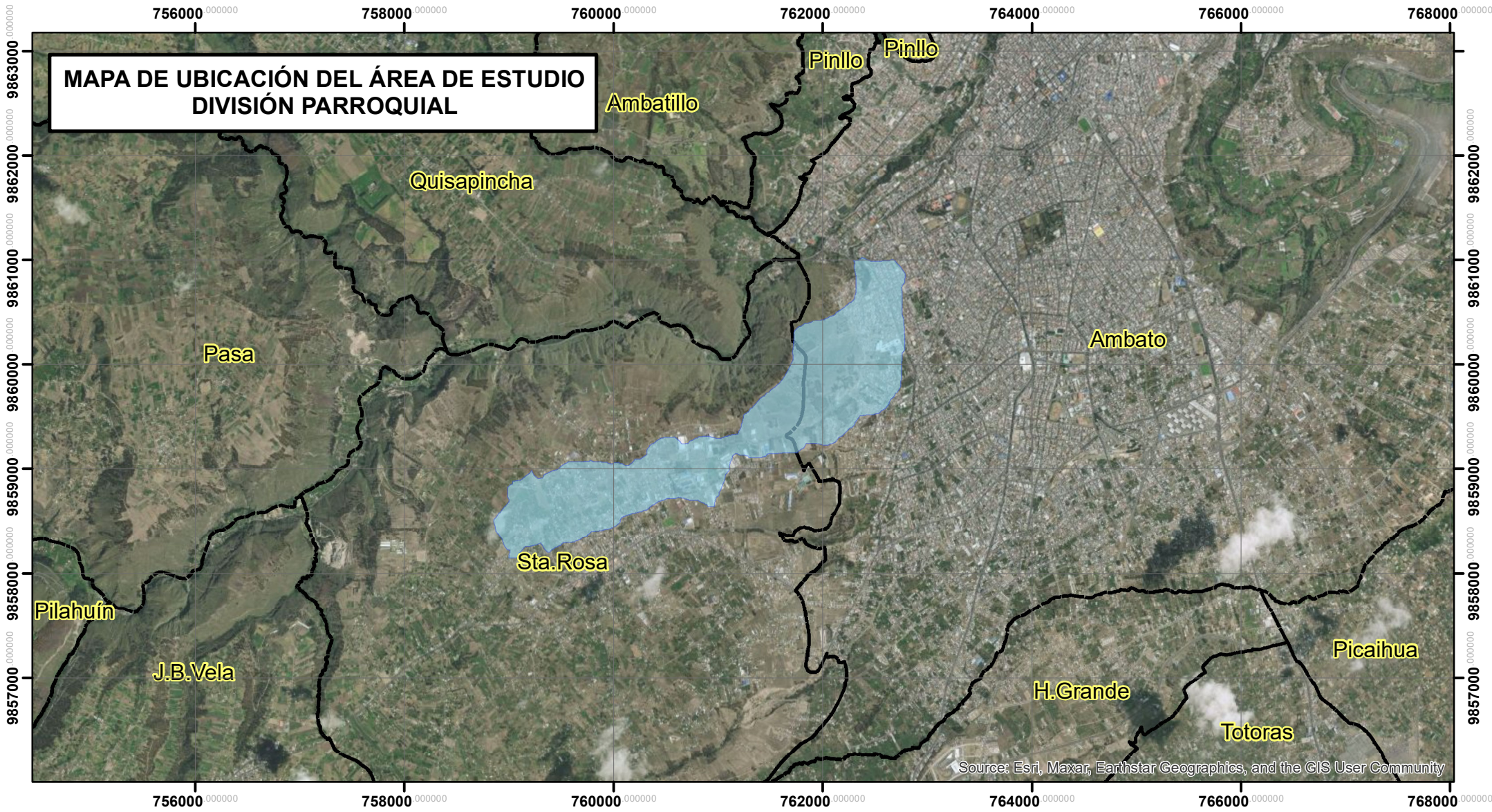
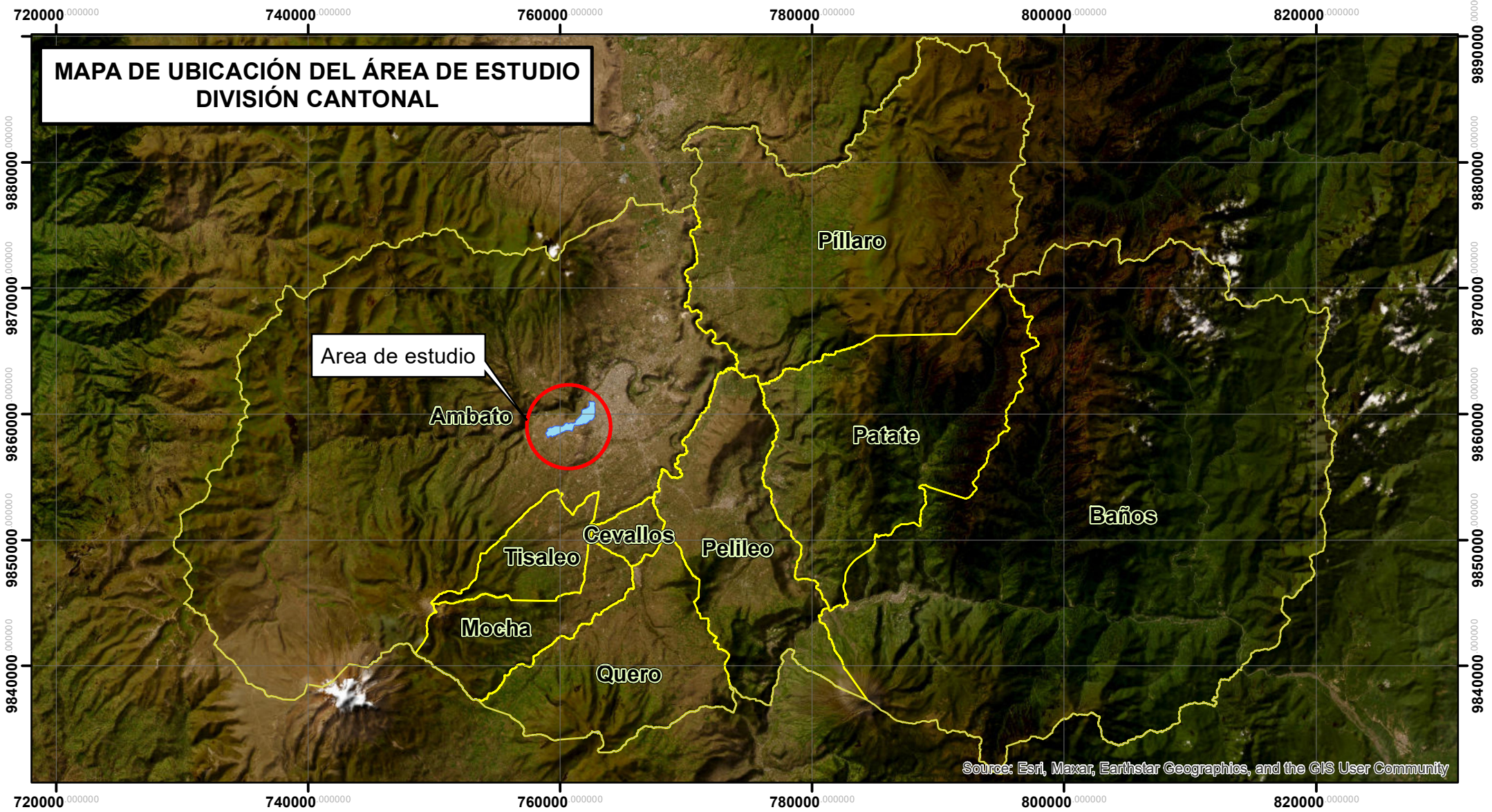
[23] (K. Beven, *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, 2nd ed. London, UK: John Wiley & Sons, 2012.)

[24] P. Pérez, L. Aguilar, and R. Torres, “Impacto de la expansión agroproductiva en cuencas andinas,” *Revista Latinoamericana de Gestión Ambiental*, vol. 15, no. 3, pp. 88–102, 2021.)

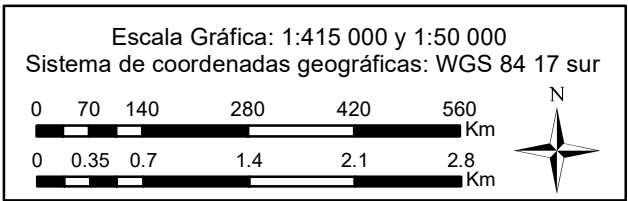
[25] (GAD Municipalidad de Ambato, *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Ambato 2021–2035*, Ambato, Ecuador, 2021.)

ANEXO 1

MAPA DE UBICACIÓN DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA



UBICACIÓN

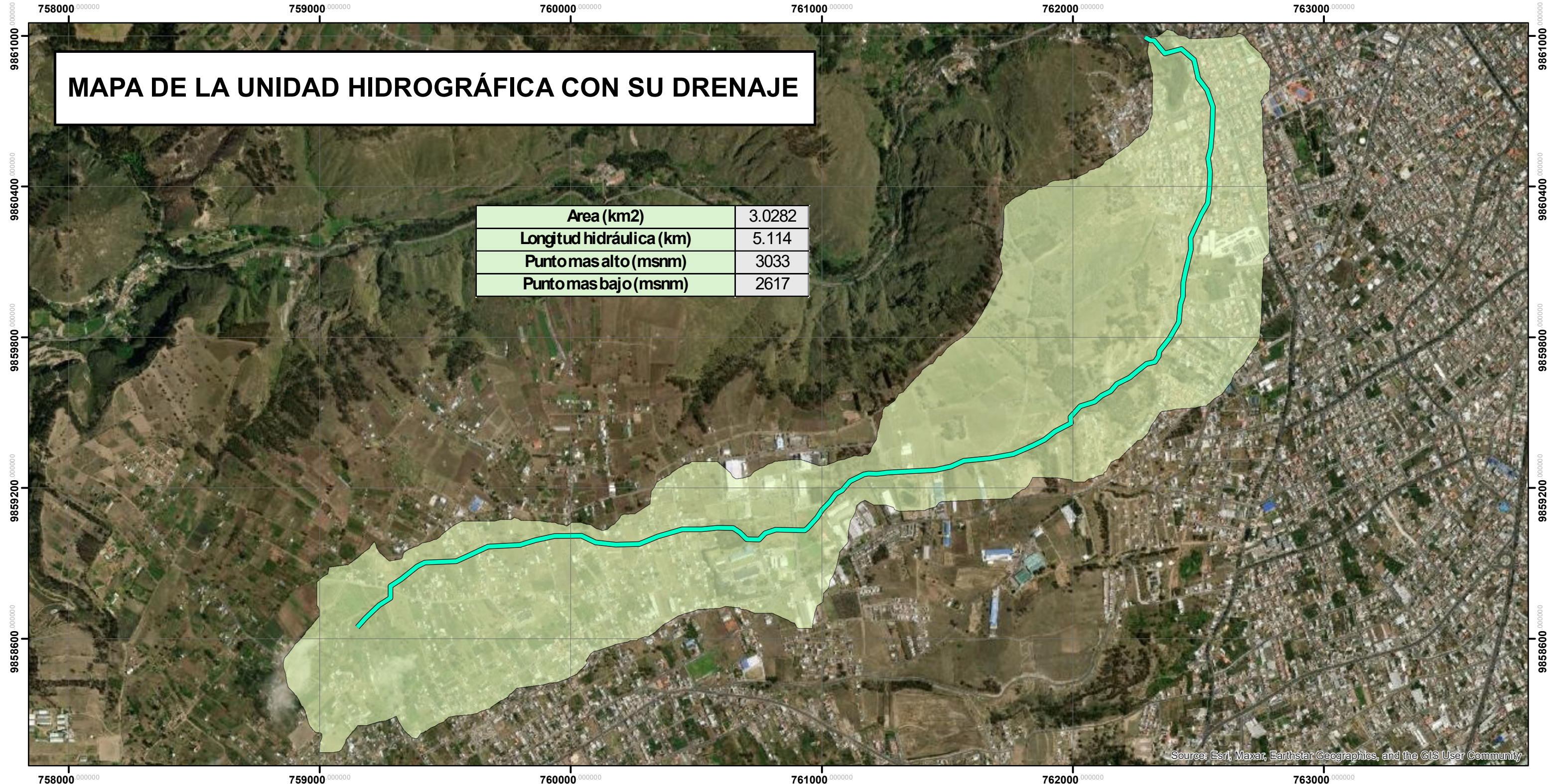


 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA 	
MAPA DE UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO DIVISIÓN CANTONAL Y PARROQUIAL	
AUTOR: Oscar Dávila	TAMAÑO DE IMPRESIÓN: A3
FUENTE: HGPT, IGM, CONALIS, UTA	MAPA NÚMERO:1

LEYENDA	
	Unidad Hidrográfica
	División Cantonal
	Límite Tungurahua

ANEXO 2

MAPA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA Y SU DRENAJE



Area (km2)	3.0282
Longitud hidráulica (km)	5.114
Punto mas alto (msnm)	3033
Punto mas bajo (msnm)	2617

Escala Gráfica: 1:15 000

Sistema de coordenadas geográficas: WGS 84 17 sur

00.1750.350.71.051.4

Km

N

Leyenda unidad hidrográfica

Drenaje_unidad_hidrografica

unidad_hidrografica





UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

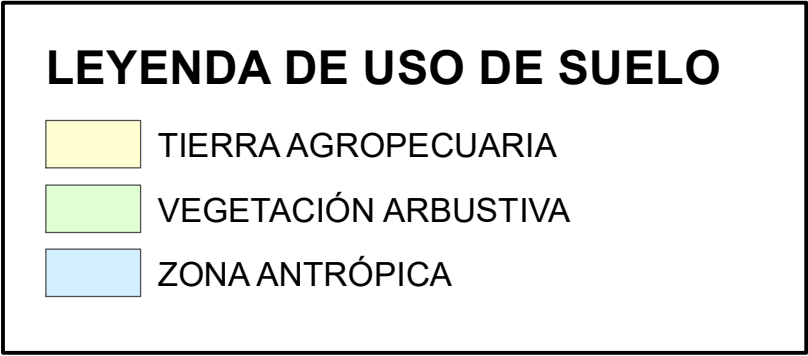
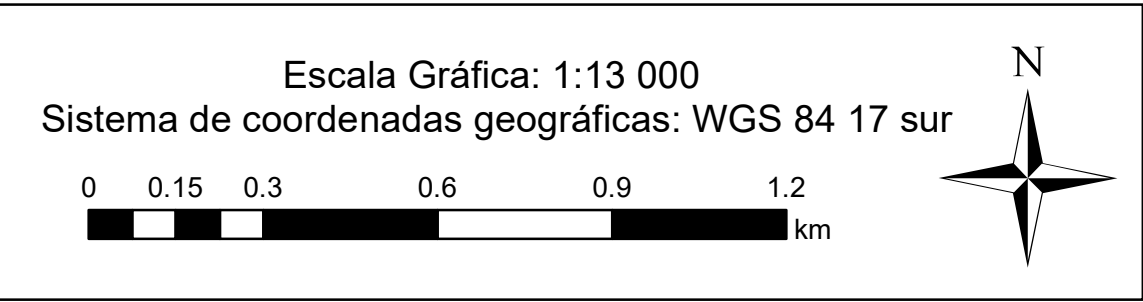
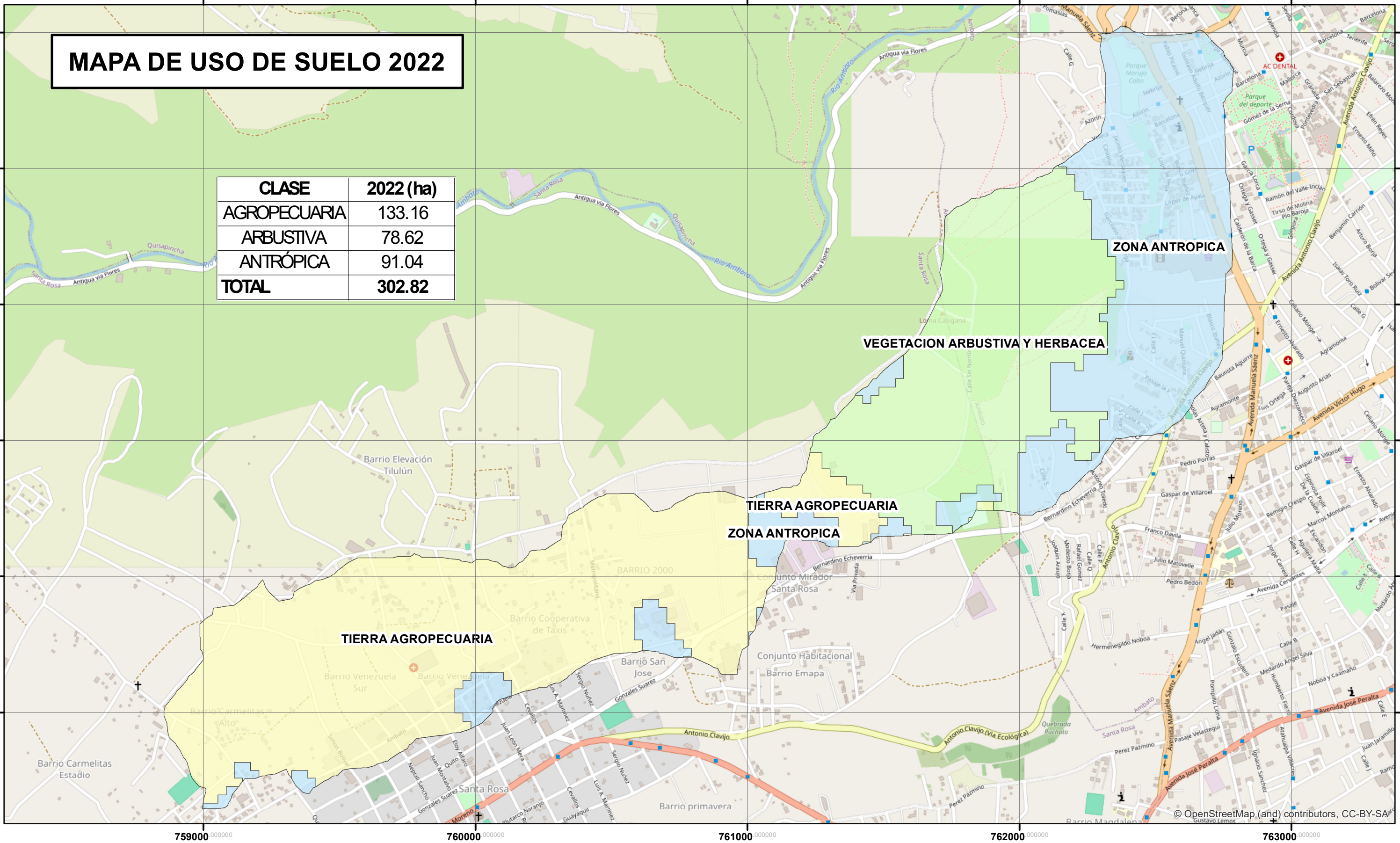
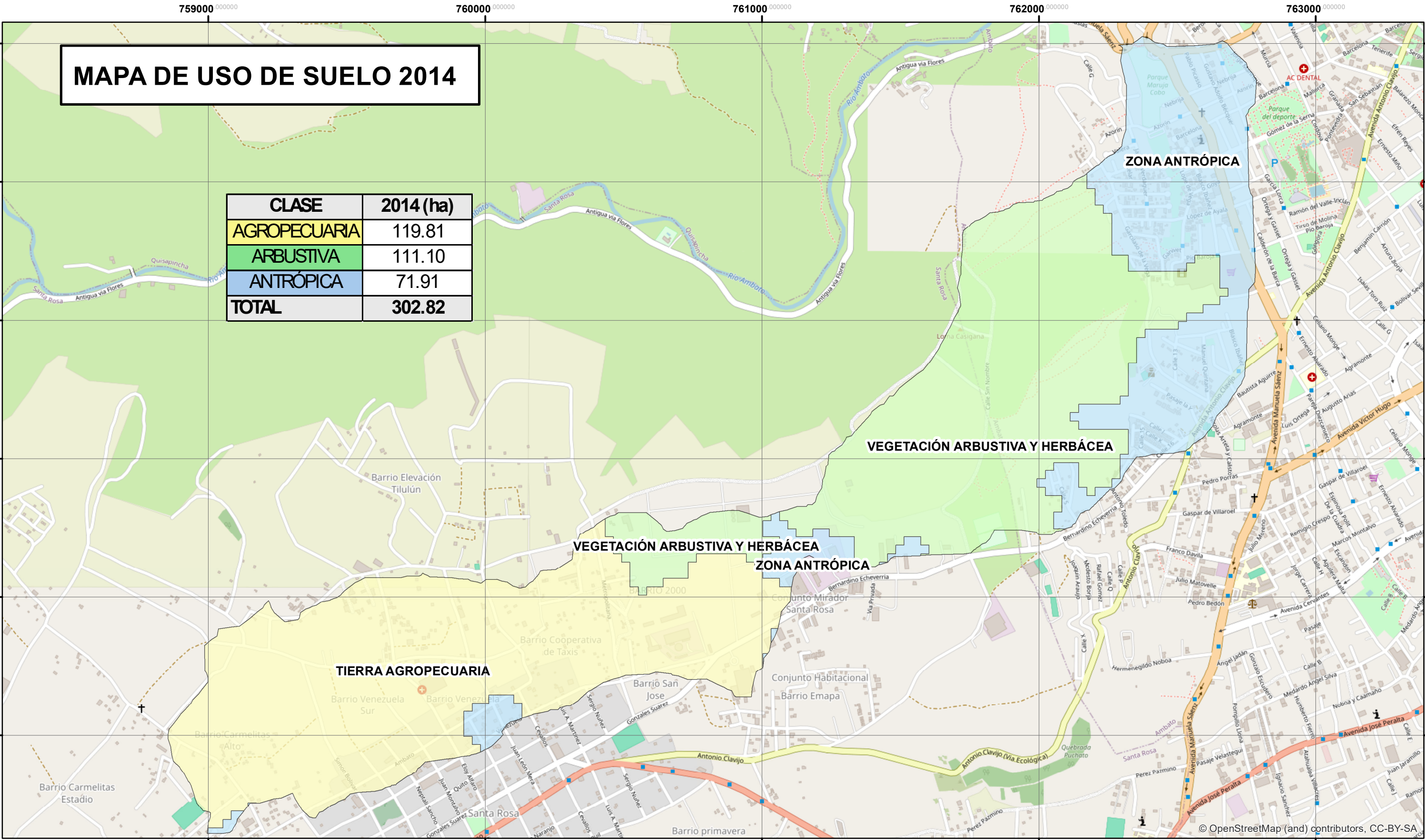


MAPA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA
RIO AMBATO -TRAMO SUR ORIENTAL
AVENIDA MANUELITA SAENZ

AUTOR: Oscar Dávila	TAMAÑO DE IMPRESIÓN: A3
FUENTE: HGPT, IGM, CONALIS, UTA	MAPA NÚMERO: 2

ANEXO 3

MAPA DEL USO DE SUELO 2014 VS 2022





UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



"MAPA DE USO DE SUELO"
2014 Y 2022

AUTOR: Oscar Dávila	TAMAÑO DE IMPRESIÓN: A2
FUENTE: HGPT, IGM, CONALIS, UTA	MAPA NÚMERO:3

ANEXO 4

MAPA DEL TIPO DE SUELO 2014 VS 2022

