



*Evaluación y
representación
espacial del
potencial hídrico
superficial de la
cuenca
hidrográfica del
Río Magdalena*

Rosana Caridad Ramírez González

2019



**Universidad de Oriente
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Hidráulica**

***Evaluación y representación espacial
del potencial hídrico superficial de la
cuenca hidrográfica del Río
Magdalena***

Tesis en opción al título de Ingeniera Hidráulica

Autora:

Rosana Caridad Ramírez González

Tutores:

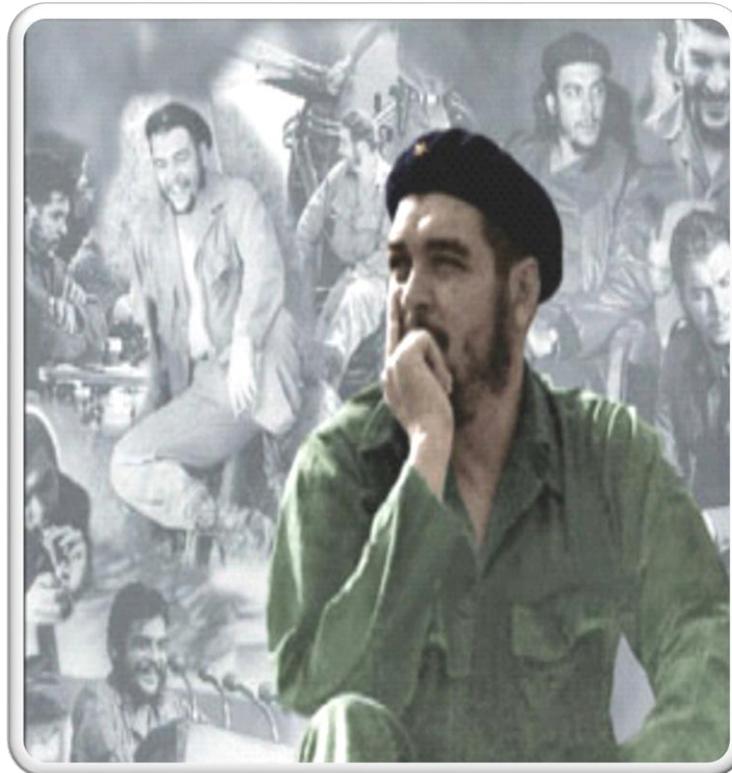
Dr.C Líber Galban Rodríguez

Ing. Alain Paneque Martínez

Santiago de Cuba,

Junio, 2019

PENSAMIENTO:



En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana”.

Ché.

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo con toda la admiración, el amor y el respeto a mis queridos padres Niurka González Rodríguez, y Ramón Ramírez Rodríguez que han batallado infatigablemente conmigo en todos estos años, apoyándome de todas las maneras posibles para que mis metas y mis sueños se hagan realidad.

- ✓ *A mis tías, que constantemente me ayudaron y estuvieron pendientes a desempeño como estudiante.*
- ✓ *Al resto de mi familia, que aunque no asistieron en mi presentación de tesis siempre estuvieron presentes de una manera u otra, contribuyendo a mi desarrollo.*
- ✓ *A mis amigos que estuvieron presentes en los buenos y en los malos momentos.*

AGRADECIMIENTO

- ✓ *A Dios que se empeño en sacarme adelante a pesar de las situaciones y los malos momentos que me preparaba la vida, por enseñarme casi a la fuerza y dejando secuelas, a valorar las cosas y a apreciar lo que verdaderamente nos da la felicidad; y permitirme llegar a este momento con buena salud y junto a todas las personas que quiero.*
- ✓ *A mis tutores Dr.C Liber Galbán Rodríguez y al Ing. Alain Paneque Martínez por poner todo su empeño, su tiempo, su conocimiento y toda su paciencia durante la realización de esta investigación.*
- ✓ *A todos mis queridísimos profesores, a quienes admiro y respeto muchísimo, por enseñarme tanto durante todos estos años, por toda la paciencia que tuvieron conmigo, por ser tan excelentes profesores y seres humanos, gracias a todos por todo.*
- ✓ *A mi novio Frank Javier Rodríguez Romero por estar hay en las buenas y las malas a mi lado y por su paciencia todos estos años.*
- ✓ *A todas mis amigos de la escuela (Surelis, Raisa, Yurianna, Jay a mis compañeras de cuarto por compartir todos estos años conmigo en la universidad y apoyarme, "a su manera", en todo lo que podían, y las que no están aquí (Kendra, Hiro, Daniela) también muchas gracias, las quiero mucho.*
- ✓ *A todas esas personas que de una manera u otra me han ayudado. Gracias.*

Resumen

En Cuba, actualmente, se encuentra en fase de estudio e implementación un programa hidroenergético nacional que incremente la capacidad instalada; en el cual se concibe la producción de hidroenergía a partir de los Embalses ya construidos y en canales y espejos de agua conocidos. Este programa tiene como limitante el conocimiento detallado del verdadero potencial hidroenergético con que cuenta la nación, para lo cual se hace necesario realizar estudios hidrológicos complejos, que con el auxilio de software profesionales y técnicas estadísticas, que ayuden a determinar y modelar el potencial hídrico superficial e hidroenergético real existente.

Para lograr este objetivo, fue seleccionada la cuenca hidrográfica del Río Magdalena en el municipio Santiago de Cuba, fue elaborado un procedimiento metodológico que permite garantizar los pasos a seguir durante los trabajos empleando software profesionales como los SIG, métodos hidrológicos y técnicas estadísticas; y finalmente se pudo evaluar y representar espacialmente el potencial hídrico superficial preliminar en esta cuenca.

Los resultados obtenidos en una primera instancia, demuestran que es factible la aplicación de este procedimiento para conocer de forma preliminar con qué caudal medio se cuenta en cualquier punto de un río principal o afluente de la cuenca hidrográfica seleccionada (Magdalena), de forma espacial con el empleo de un SIG basado en el software profesional Mapinfo 10.5; lo cual puede ser más preciso si se aplican otros métodos y escalas cartográficas más detalladas.

Abstract

In Cuba, at the moment, a national hydro-energetic program that increases the installed capacity is in the phase of study and implementation; in which the production of hydro-energy is conceived from the dams already built and in known channels and water mirrors. This program has as a limitation the detailed knowledge of the true hydropower potential of the nation, for which it is necessary to carry out complex hydrological studies, which with the help of professional software and statistical techniques, help to determine and model the surface water potential existing hydro-energetic.

To achieve this objective, the Magdalena River watershed in the municipality of Santiago of Cuba was selected. A methodological procedure was developed to guarantee the steps to be followed during the work using professional software such as GIS, hydrological methods and statistical techniques; and finally, it was possible to evaluate and spatially represent the preliminary surface water potential in this basin.

The results obtained in a first instance, show that it is feasible to apply this procedure to know in a preliminary way what average flow is available at any point of a main river or tributary of the selected watershed (Magdalena), in a spatial way with the use of a GIS; in this case Mapinfo professional 10.5, which may be more accurate if other methods and more detailed cartographic scales are applied.

ÍNDICE:

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: EL POTENCIAL HIDRICO DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	7
1.1 Enfoque conceptual de la determinación de los potenciales hídricos superficiales en cuencas hidrográficas	7
1.1.1 Influencia de las lluvias medias anuales	13
1.1.2 Métodos estadísticos e hidrológicos empleados para la determinación de potenciales hídricos superficiales (Esguerrimiento superficial) en cuencas hidrográficas	18
1.2 Estado de la determinación de los potenciales hídricos superficiales en cuencas hidrográficas internacionalmente y en Cuba	29
1.3 La representación espacial de cuencas hidrográficas con el uso de SIG	30
CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR y REPRESENTAR ESPACIALMENTE EL POTENCIAL HIDRICO SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS	32
2.1 Identificación y caracterización físico-geográfica general de la cuenca hidrográfica objeto de estudio	32
2.2 Selección del método para determinar el potencial hídrico superficial (esguerrimiento superficial) en la cuenca hidrográfica, subcuencas y microcuencas objeto de estudio	35
2.3 Determinación y representación espacial de los parámetros que sirven como base para los cálculos del potencial hídrico superficial	35
2.4 Representación espacial del potencial hídrico superficial en la cuenca o subcuencas seleccionadas con el uso de un SIG	38
CAPÍTULO 3: EL POTENCIAL HIDRICO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO MAGDALENA EN SANTIAGO DE CUBA	40
3.1 Identificación y caracterización físico-geográfica general de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena	40
3.2 Selección del método para determinar el potencial hídrico superficial (esguerrimiento superficial) en la cuenca hidrográfica, subcuencas y microcuencas objeto de estudio	43
3.3 Determinación y representación espacial de los parámetros que sirven como base para los cálculos del potencial hídrico superficial	44
3.4 Representación espacial del potencial hídrico superficial en la cuenca hidrográfica del Río Magdalena con el uso de un SIG	50
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54

INTRODUCCIÓN

En la antigüedad los grandes ríos fueron la fuente donde se desarrollaron las civilizaciones que imprimieron un nuevo curso a la historia de la humanidad, llamada por los historiadores como “civilizaciones fluviales”. Estos ríos, lagos y tierras húmedas del mundo proporcionan la mayor cantidad de agua que se utiliza para el consumo humano, la agricultura, el saneamiento y la industria, así como para la vida de plantas y animales. Debido al deterioro de la situación ambiental a partir de la década de los 70 del siglo XX, se ha producido un incremento en la contaminación de ecosistemas acuáticos, atmósfera y suelos, sobreexplotación de recursos naturales, pérdida de suelo por erosión, desertificación, efecto invernadero y lluvias ácidas, entre otros factores incorporados como amenazas no sólo para el hombre, sino también para el planeta. (Castro, 1992).

Particularmente, la aplicación de la planificación hídrica es relevante en zonas fluviales (cuencas hidrográficas), afectadas por el desarrollo de la sociedad. Según **González** (2003), en Cuba, antes de 1959 no existía un programa o proyecto gubernamental para gestionar o reducir el impacto social en las cuencas hidrográficas. A partir de esta fecha, se ha potenciado en Cuba lo que se ha conocido también como “manejo de cuencas”, que se caracteriza por una administración sectorial especialmente dirigida hacia los ámbitos de los recursos hídricos, los recursos agroforestales y a la agricultura extensiva.

En 1997 se creó el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH) y estructuras inferiores. Su principal función es coordinar los esfuerzos de todas las instituciones del país relacionadas con las cuencas hidrográficas para eliminar o reducir los factores de degradación ambiental de las mismas. Existe un Comité Técnico Asesor que tiene la función de asesorar a la dirección de la CNCH para la toma de decisiones; en este Comité están representados los principales ministerios e instituciones del país, está compuesto por un Presidente, un Vicepresidente, un Secretario y miembros permanentes para el cumplimiento de sus funciones. Desde abril de 1997 hasta febrero de 2005 fue presidido por el Ministerio Ciencia, Tecnología y Medioambiente (CITMA) y a partir de ahí hasta la actualidad, por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y actualmente existe la Resolución 52 del 2007 sobre el Reglamento del Consejo Nacional, de los Consejos Territoriales y los Consejos Específicos de Cuencas Hidrográficas.

A nivel de país se trabaja en el diseño de políticas y mecanismos de planificación para el ordenamiento, con el propósito de articular las estrategias de conservación y aprovechamiento sostenible de sus recursos naturales. A pesar de esto, persisten importantes conflictos socio-ambientales en torno a la administración hídrica en las cuencas hidrográficas. (Planas *et al*, 2012).

En la actualidad uno de los usos más extendidos del recurso agua producido naturalmente en las cuencas hidrográficas del planeta es la hidroenergía. La utilización del agua en Cuba para generar electricidad data de principios del siglo XX, cuando se pusieron en explotación pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, de los cuales algunos se mantienen generando en la actualidad, como la Pequeña Central Hidroeléctrica Guaso en Guantánamo (Figura 1), con una potencia instalada de 1 750 kW; San Blas en Cienfuegos, con 1 000 kW; Piloto y San Vicente en Pinar del Río, con 295 y 71,2 kW, respectivamente, y Barranca en Granma, con 200 kW. Sin embargo, en las zonas montañosas de las provincias orientales aún se conservan ruinas que demuestran que ya en el siglo XIX se utilizaba la energía hidráulica para mover despulpadoras de café y molinos de granos. En los primeros años de la Revolución se concluyó y se puso en explotación la central hidroeléctrica Hanabanilla, que se encontraba en construcción, con 43 MW de potencia instalada.



Figura 1. Central hidroeléctrica Guaso en Guantánamo, una de las más antiguas de Cuba, puesta en funcionamiento en el año 1917. Fuente: Salomón, 2018.

En el caso de la electricidad producida a partir de la energía mecánica o hidroenergía que portan los flujos de agua natural, Cuba cuenta actualmente con 180 instalaciones hidro-generadoras, distribuidas en nueve provincias y 38 municipios, de las cuales 149 prestan

servicio de energía eléctrica a ocho mil 629 viviendas que albergan conjuntamente a 34 mil habitantes en zonas rurales y montañosas de difícil acceso principalmente (Pérez, 2017). Entre los beneficiados se incluyen 78 consultorios médicos, 138 escuelas, y otros 529 objetivos económicos y sociales. Las 31 instalaciones restantes entregan su energía al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). (Pérez, 2017)

Actualmente, se encuentra en fase de estudio e implementación un programa hidroenergético nacional que incremente la capacidad instalada; en el cual se concibe la producción de hidroenergía a partir de las Presas ya construidas en el país y del agua disponible en canales y espejos de agua conocidos. Para ello se ha elaborado un programa para la construcción de 74 Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHE) con más de 56 MW. Una vez instalada toda la potencia proyectada, el programa producirá una generación de 274 GWh anuales, lo que permite dejar de emitir a la atmósfera 230 mil toneladas de CO₂. (Rosales, 2016) (Figura 2)

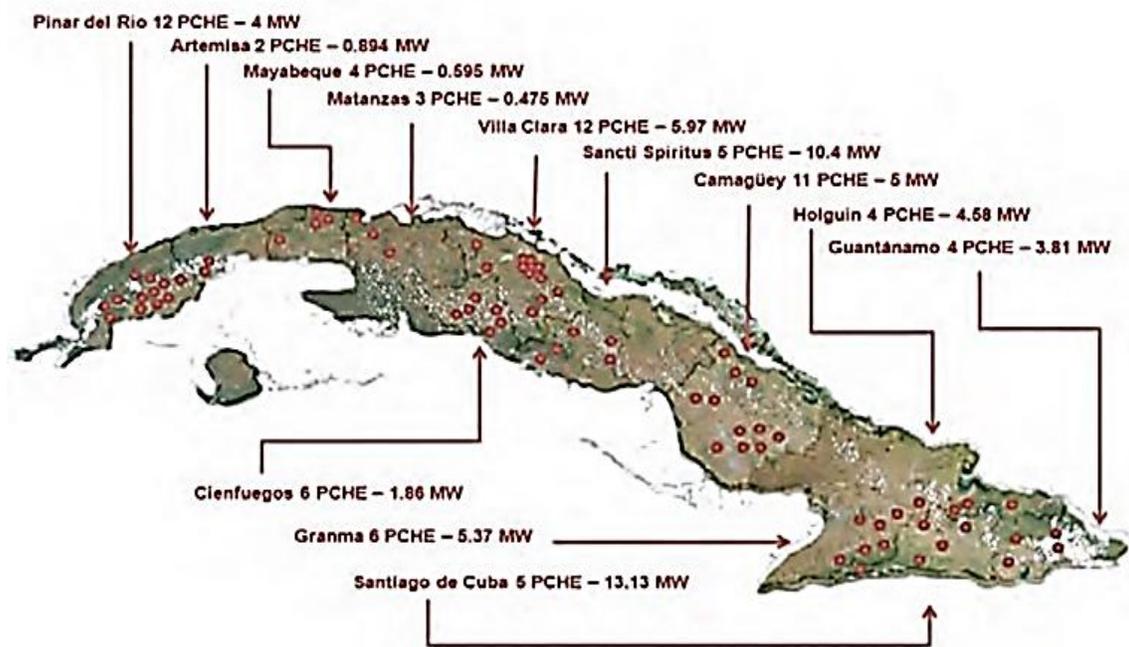


Figura 2. Mapa que muestra la proyección futura de desarrollo de la hidroenergía en Cuba hasta el 2030. Fuente: Rosales, 2016.

La visión inicialmente desarrollada por la Dirección central del Estado descrita con anterioridad, tiene como limitante el conocimiento detallado del verdadero potencial hidroenergético con que cuenta la nación, para lo cual se hace necesario realizar estudios hidrológicos complejos, que con el auxilio de software profesionales y técnicas estadísticas, ayuden a determinar y modelar el potencial hídrico superficial e hidroenergético real existente.

En consecuencia con las necesidades actuales del país, y teniendo en cuenta el alto consumo de energía eléctrica y el creciente incremento de la demanda energética en la provincia de Santiago de Cuba; además de los serios problemas enfrentados por algunas comunidades rurales donde es casi nulo y, en algunas ocasiones deficiente el servicio eléctrico, se hace necesario un estudio detallado para la determinación del potencial hídrico superficial que presenta la provincia, sobre la base incrementar el conocimiento requerido para implementar con eficiencia el Programa nacional para la utilización de las energías renovables en Cuba; que tiene como limitante el concebir para la provincia Santiago de Cuba solo 4 nuevas inversiones emplazadas en las presas.

Particularmente, la vertiente Sur-Este de la provincia Santiago de Cuba, que comprende los municipios costeros de Guamá y Santiago de Cuba, posee características montañosas y, una elevada cantidad de Cuencas hidrográficas, cuyo potencial hídrico superficial de forma general se conoce únicamente para los cierres de las cuencas hidrográficas existentes (Figura 3), y para aquellos puntos de la geografía santiaguera donde por necesidades específicas en comunidades montañosas y en algunos afluentes con una reducida cantidad de mini hidroeléctricas instaladas, ha sido determinado para dar respuesta de la demanda eléctrica de estas comunidades aisladas (Figura 3).

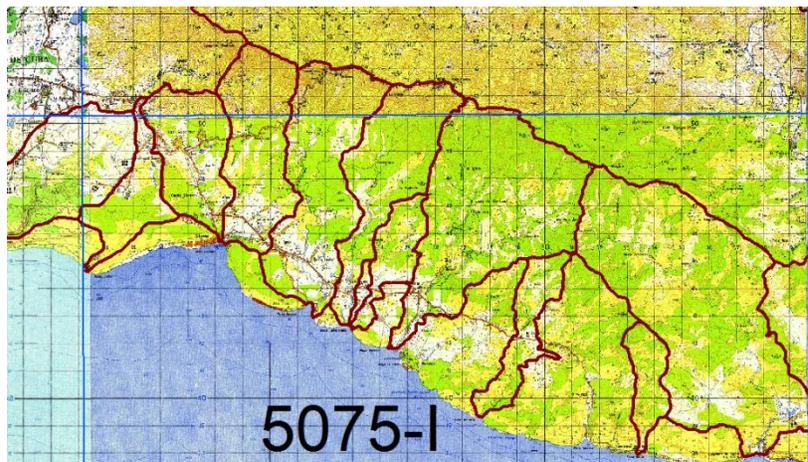


Figura 3. Imagen de la demarcación de las cuencas hidrográficas de la parte Sureste de la provincia Santiago de Cuba.

Específicamente el municipio Santiago de Cuba ocupa la parte sur este de la provincia de igual nombre, se desarrollan cuencas hidrográficas cuyo potencial hídrico superficial detallado necesita ser estudiado bajo nuevos métodos, que incluyan la representación del comportamiento espacial de este indicador a través de los afluentes, microcuencas y

subcuencas; de manera que posteriormente pueda ser determinado el potencial hidroenergético de estas, y modelado su comportamiento bajo la misma concepción.

Entre las cuencas deficitarias de este estudio detallado está la cuenca hidrográfica del Río Magdalena, por lo que una aproximación a su determinación y representación espacial contribuiría significativamente a resolver las limitantes planteadas en el Programa Energético Nacional.

Problema de la investigación: Insuficiencias en la determinación y representación espacial del potencial hídrico superficial detallado de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena en el municipio Santiago de Cuba, para resolver las demandas establecidas en el programa nacional de aprovechamiento de fuentes renovables de energía.

Objeto de la investigación son: La cuenca hidrográfica el Río Magdalena en el municipio Santiago de Cuba.

Los sistemas informáticos y software profesionales existentes hoy día, permiten a partir de un extenso trabajo de medición y búsqueda de información, la integración de datos hidrológicos y su posterior análisis, para luego determinar y representar espacialmente el potencial hídrico superficial existente, entre estos se encuentran los Sistemas de Información Geográfica.

Por otro lado, los hidrólogos, geólogos, meteorólogos y especialistas dedicados al estudio de los patrones hidrometeorológicos, entre otros, han diseñado distintos métodos que emplean técnicas estadísticas para el procesamiento de la información hidrológica que se generan en las distintas zonas geográficas y cuencas hidrográficas; su integración en función de la determinación de los potenciales hídricos superficiales son de gran utilidad, si se combinan de forma armónica en un procedimiento diseñado para tales fines.

Objetivo general de la investigación: Determinar y representar espacialmente con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos hidrológicos, el potencial hídrico superficial de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena al Sur este del municipio Santiago de Cuba.

Objetivos específicos

1. Realizar la fundamentación teórica, conceptual y metodológica de la obtención y representación espacial del potencial hídrico superficial en cuencas hidrográficas.

2. Elaborar un procedimiento que permita garantizar la base cognoscitiva y el instrumento para la representación del potencial hídrico superficial detallado en cuencas hidrográficas empleando SIG y métodos hidrológicos.
3. Aplicar el procedimiento propuesto en la cuenca hidrográfica del Río Magdalena.

Campo de acción: El potencial hídrico superficial detallado de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena.

Hipótesis: Si se realiza la evaluación y representación espacial del potencial hídrico superficial detallado de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena con el uso de SIG y métodos hidrológicos, será posible contribuir a un futuro desarrollo hidroenergético en la misma que satisfaga las demandas establecidas en el programa nacional de aprovechamiento de fuentes renovables de energía.

La **actualidad** de la investigación radica en su correspondencia con los objetivos priorizados del país establecidos en el “Programa nacional para la utilización de las energías renovables en Cuba hasta el 2030”; con los objetivos estratégicos nacionales del CITMA y con los lineamientos de la Política Económica y Social del Partido Comunista de Cuba aprobados por el 6to Congreso.

Métodos de investigación, entre ellos: el histórico-lógico, el hipotético deductivo, la observación, análisis y síntesis, inducción-deducción, la representación espacial, el método hidrológico, la cartografía, entre otros.

CAPÍTULO 1: EL POTENCIAL HIDRICO DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

1.1 Enfoque conceptual de la determinación de los potenciales hídricos superficiales en cuencas hidrográficas.

Una **cuenca hidrográfica** es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que sus aguas dan al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico (Klaus-Jurgen, 2010). También se define como una unidad fisiográfica conformada por la reunión de un sistema de cursos de ríos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o divisoria de aguas se definen naturalmente y en forma práctica corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

Una cuenca no solamente abarca la superficie, largo y ancho, sino también la profundidad, comprendida desde el extremo superior de la vegetación hasta los estratos geológicos limitantes bajo la tierra. Dentro de ella se pueden distinguir la parte alta y la parte baja. En las partes altas la topografía normalmente es empinada y generalmente están cubiertas de bosque. En la parte alta se encuentran la gran mayoría de las nacientes y de los ríos; las partes bajas, a menudo tienen más importancia para la agricultura y los asentamientos humanos, porque ahí se encuentran las áreas más planas. Existe una relación directa entre ellas, de forma que las acciones que el hombre realiza en la parte alta afectan de manera determinante en la parte baja. Por esta razón, la cuenca como sistema natural reúne todas las condiciones para utilizarla como unidad planificadora en el establecimiento de programas integrados que permitan la solución de sus problemas.

González (2007) describe a una cuenca hidrográfica es la superficie terrestre drenada por un sistema fluvial continuo y bien definido, cuyas aguas vierten a otro sistema fluvial o a otros objetos de agua, con características geosistémicas propias y con límites generalmente determinados por la divisoria principal según el relieve, estas ocupan el espacio del territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, que conforman los sistemas hídricos superficiales en toda la tierra emergida del planeta, teniendo un ámbito tridimensional que integra las interacciones entre la cobertura sobre el terreno, las profundidades del suelo y el entorno de esta línea divisoria. Estos subsistemas variarán de acuerdo al medio en el que esté ubicada la cuenca y el nivel de intervención del factor humano. (Umaña, 2002).

Desde el ámbito socioeconómico en la cuenca hidrográfica se encuentran los recursos naturales y la infraestructura creada por las personas, en las cuales desarrollan sus actividades económicas y sociales generando diferentes efectos favorables y no favorables para el bienestar humano y los procesos naturales que en ella se desarrollan; por lo que esta tiene la capacidad natural de prestar servicios ambientales por su vocación o posibles usos potenciales para el abasto de agua para la población y el desarrollo agropecuario, la pesca, acuicultura, la producción hidro-energética, la minería, el turismo, la conservación y el desarrollo poblacional (Umaña, 2002). Teniendo en cuenta la acción de los eventos extremos se puede catalogar como un escenario dinámico integrado por los recursos naturales, infraestructura, medios o servicios y las actividades que desarrolla el hombre generando efectos positivos y negativos sobre los sistemas naturales de la cuenca, razón por la cual deben considerarse los peligros y riesgos ante eventos extremos y fenómenos naturales severos (Umaña, 2002). (Figura 1.1):

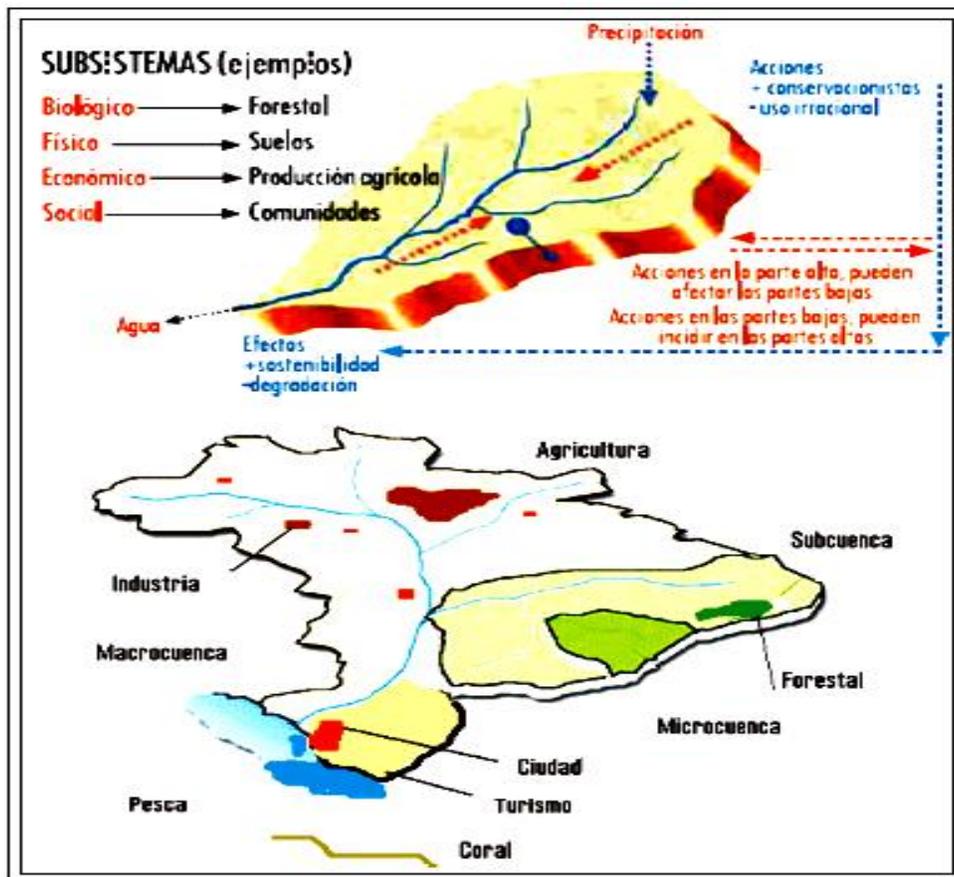


Figura 1.1: Esquemas que muestran las interacciones y actividades que se desarrollan en una cuenca hidrográfica. Fuente: García y Gutiérrez (2015).

Es importante hacer notar que la expresión “cuenca hidrográfica” engloba los recursos hídricos superficiales y sub-superficiales, los recursos del suelo y la tierra, los ecosistemas de humedales y los ecosistemas asociados, incluidos los sistemas marinos costeros que están vinculados hidrológica o ecológicamente con la cuenca hidrográfica. Las zonas de captación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca hidrográfica pueden no siempre coincidir con los límites de las zonas de captación de los recursos hídricos superficiales, y ello se ha de tener en cuenta al definir la extensión de una cuenca hidrográfica a efectos de su gestión y administración (García y Gutiérrez, 2015).

Los recursos naturales que se encuentra dentro de las cuencas hidrográficas son bienes contenidos en los ecosistemas que son valorizados socialmente, pues constituyen el soporte de actividades económicas y productivas; son además integrantes de complejos ecosistemas donde componentes bióticos y abióticos interactúan entre sí, reciben entradas de energía, materia e información y en el marco espacial de las unidades sistémicas definidas por las cuencas hidrográficas, se producen ciclos biogeoquímicos, transformaciones y salidas de la energía, materia e información ingresadas a modo de respuestas de este operador sistémico de la naturaleza (García y Gutiérrez, 2015).

Los componentes que determinan el funcionamiento de una cuenca son los naturales y los de generación antrópica. Dentro de los naturales están los bióticos como el hombre, la flora y la fauna; y los componentes abióticos como el agua, el suelo, el aire, los minerales, la energía y el clima. Los elementos de generación antrópica, o generados por el hombre, pueden ser de carácter socioeconómico y jurídico-institucional. Entre los socioeconómicos se encuentran: la tecnología, la organización social, la cultura y las tradiciones, la calidad de vida y la infraestructura desarrollada. Entre los jurídico-institucionales están: las políticas, las leyes, la administración de los recursos y las instituciones involucradas en la cuenca. Los componentes abióticos y bióticos están condicionados por las características geográficas (latitud, altitud), geomorfológicas (tamaño, forma, relieve, densidad y tipo de drenaje), geológicas (orogénicas, volcánicas hidrográfica y sísmicas) y demográficas (la población).

Según lo expresado por la Ley 81 del medio ambiente (1997), es un espacio geográfico donde se forman las redes hidrográficas y ocurren las relaciones con las aguas subterráneas, lo es también para el propio desarrollo económico y social y para la aplicación de las medidas de protección de los componentes naturales (suelos, bosques, costas, aguas costeras, diversidad

biológica) y antrópico (ciudades y pueblos y su producción y servicios asociados generadores de desechos sólidos y líquidos, industrias, viales, cultivos y ganadería, embalses, canales, pozos) que definen el medio ambiente. Se puede decir que una cuenca hidrográfica está compuesta por determinadas partes, según el criterio que se utilice: por la dirección de la evacuación de las aguas, por su ecosistema, por su relieve, por su tamaño y por la altitud:

- **Altitud:** Si el criterio utilizado es la altura, se podrían distinguir las siguientes partes (Figura 1.2): Parte Alta, Parte Media, Parte Baja, Zona de transición y zona costera.

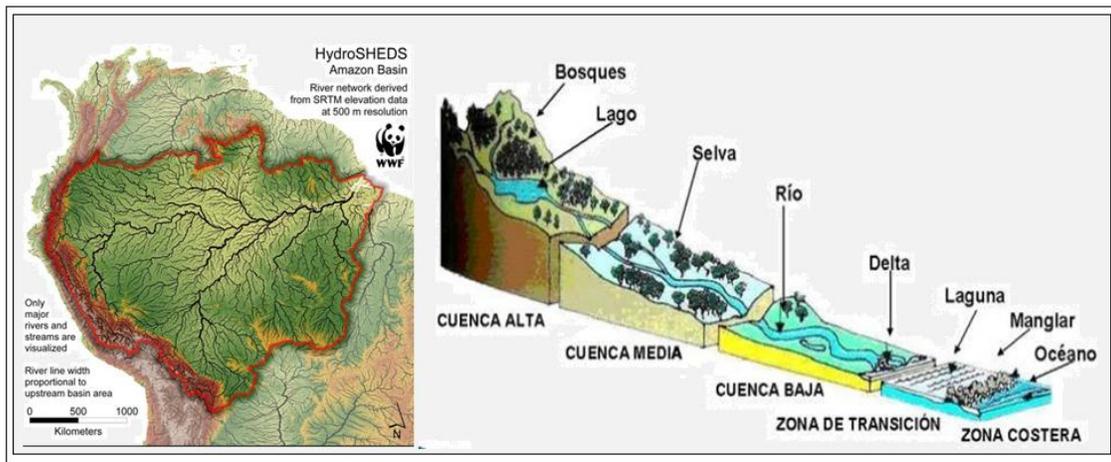


Figura 1.2: Imagen de la cuenca hidrográfica del río Amazonas en América del Sur (izquierda), Fuente: Oliveras, Jordi. (2014). Partes de una Cuenca Hidrográfica (derecha), Fuente: CIAS,1998.

La cuenca hidrográfica y la zona costera hacia donde drenan sus aguas, guardan una estrecha relación. La zona costera es la receptora directa de todos los procesos y fenómenos que tienen lugar en la cuenca hidrográfica. El aumento o disminución de los caudales que llegan a la costa afectan el hábitat de la misma, no solo desde el punto de vista cuantitativo, sino también cualitativo.

El sistema de la cuenca hidrográfica tiene estrecha relación entre sus partes; por ejemplo, los procesos que impactan, como la deforestación o la contaminación en la parte alta o superior de la cuenca, tienen inevitablemente consecuencias en las partes intermedias, en las bajas y en desembocaduras (García y Gutiérrez, 2015). Las cuencas hidrográficas son a menudo clasificadas por el espacio geográfico que ellas ocupan, por ejemplo, pueden ser grandes, medianas o pequeñas, pero la definición del tamaño estará en dependencia del país o la región en que se encuentren:

- **Tamaño**

Tabla 1.1: Clasificación de las cuencas hidrográficas según su tamaño (Piedra, 2011).

Tamaño	Km ²
pequeña	0.1-10 km ²
mediana	10-100 km ²
grande	Superior a 100 km ²

- **Relieve:** considerando el relieve y accidentes del terreno, las cuencas pueden denominarse (Piedra, 2011):

1. Cuencas planas.
2. Cuenca de Alta montaña.
3. Cuenca accidentada.

- **Dirección de la evacuación de las aguas** (Piedra, 2011):

1. **Arreicas:** las aguas se evaporan o se filtran en el terreno.
2. **Endorreicas:** desembocan en lagos o lagunas, siempre dentro del continente. Por ejemplo, la Cuenca del río Llave.
3. **Exorreicas:** avanan sus aguas al mar o al océano. Un ejemplo es la del Rímac, en Sudamérica. Este tipo de Cuenca Hidrográfica es el objeto de estudio de la presente investigación.

- **Ecosistema** (Piedra, 2011):

Según el medio o el ecosistema en la que se encuentran, establecen una condición natural, así tenemos, las cuencas áridas, cuencas tropicales, cuencas húmedas y cuencas frías. Ejemplo: Cuenca tropical, Cuenca del Canal de Panamá, Cuenca árida, Cuenca del Río Cañete en Perú, Cuenca fría, Cuenca Lago Titicaca, entre Perú y Bolivia.

El término cuenca puede ser aplicado a un área de drenaje de una quebrada pequeña o la zona entera de afluencia de un río. Sin embargo, las cuencas grandes pueden dividirse en subcuencas y microcuencas, quedando estas definidas de la siguiente forma:

- **Subcuencas:** Unidad de drenaje de menor superficie que una cuenca y que forma parte de esta, constituyendo un tributario de la misma, o sea una cuenca que sale o que drena a una cuenca más grande
- **Microcuencas:** Es la mínima unidad territorial de drenaje dentro de una cuenca y tributaria de una subcuencas.

Cada cuenca o subcuenca, está definida administrativamente, por donde discurre un río susceptible de tomar caudales para la instalación hidroeléctrica o la construcción de otra obra hidráulica tales como obras de toma de agua, las cuales tienen una carta de presentación que define su potencial hídrico.

La determinación del *potencial hídrico superficial o escurrimiento* de la cuenca es imprescindible para la realización de un reordenamiento y planeamiento del recurso agua en esta zona, de ahí que para determinar su valor se haga necesario el vínculo de diversas ciencias como: Matemática, Computación, Estadística, Hidrología, Geodesia y Cartografía, etc.

La escorrentía (o escurrimiento) se define como aquella parte de la lluvia, del agua de deshielo y/o del agua de irrigación que no llega a infiltrarse en el suelo, sino fluye hacia un cauce fluvial, desplazándose sobre la superficie del mismo. Se denomina también escorrentía superficial o de superficie.

La escorrentía también comprende el agua que llega al cauce fluvial con relativa rapidez justo debajo de la superficie. Junto con la escorrentía superficial, este flujo, que se denomina interflujo o flujo sub-superficial, constituye el volumen de agua que en hidrología se conoce generalmente como escorrentía o escurrimiento. El motivo principal del estudio del proceso de escorrentía es la necesidad de estimar la cantidad de agua que alcanza rápidamente el cauce fluvial.

La escorrentía es el elemento más importante de la predicción de crecidas y puede consistir de agua pluvial o del agua generada por el derretimiento de la nieve y del hielo. Una vez que el agua corre sobre la superficie del suelo y alcanza los cauces de la red hidrográfica, comienza a aparecer el escurrimiento superficial en los cauces (Figura 1.3).

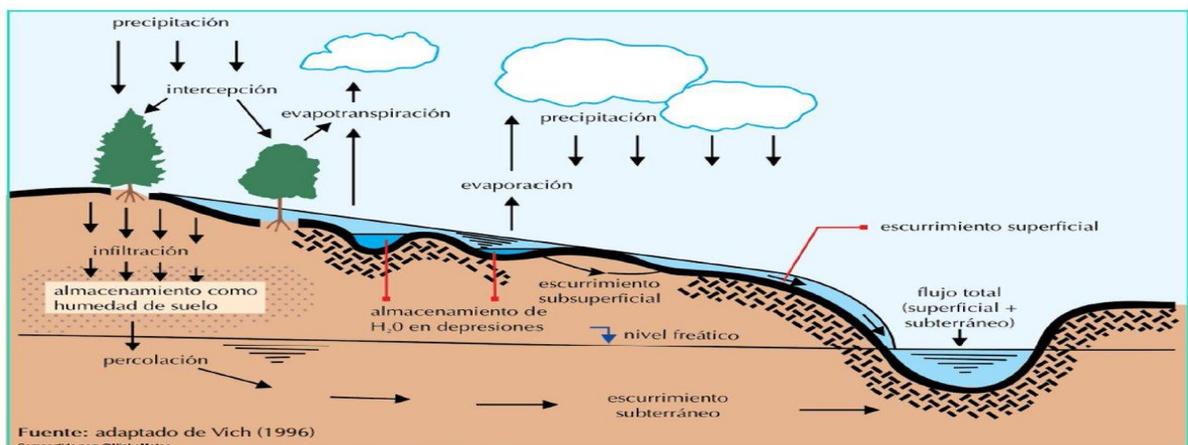


Figura 1.3 Esquema del escurrimiento superficial en los cauces de ríos de cuencas hidrográficas.

En Cuba la lámina media anual de precipitación ha sido estimada en 1 375 mm, pero este componente hidrológico está influenciado por la presencia de tormentas tropicales de notable capacidad pluvial. El potencial hídrico superficial del territorio cubano, sin embargo, ha evaluado los recursos de agua en 32.2 hm³, de los cuales 23.2 millones corresponden al escurrimiento superficial (Planos, 1997). En República Dominicana los recursos hídricos potenciales (superficial y subterráneo) tienen valores de 20,995 hm³ y 1,510 hm³ al año respectivamente. El volumen potencial de agua per cápita aprovechable anualmente se estima en 2,711 m³/hab, sin considerar la contribución directa de la lluvia (Planos, 2001).

Campos Aranda (1998) plantea que la confiabilidad de los parámetros estadísticos calculados a partir de un registro histórico de escurrimientos anuales, es directamente dependiente del número de años de la serie. Por otra parte, el número de años de registro requerido es función de la variabilidad de los datos y consecuentemente variará con el clima y las características físicas de la región.

La experiencia de la Unión Soviética ha conducido a establecer los períodos de registro que se indican en la tabla 1.2 siguiente, para determinar con aproximación los parámetros estadísticos del escurrimiento.

Tabla 1.2: Períodos de registro del escurrimiento necesarios para estimar con aproximación sus parámetros estadísticos.

Tipo de zona o región	Número de años
De bosque	> 25
De estepa	35
Montañosa	40
Semiárida	50

1.1.1 Influencia de las lluvias medias anuales (máxima, media y mínima) en la determinación del potencial hídrico en cuencas hidrográficas.

La precipitación en los estudios hidrológicos es un componente de gran importancia ya que, en cierto sentido, desata el resto de los procesos del Ciclo Hidrológico. Desde el punto de vista de la cuenca, es la precipitación la variable que entra al sistema y se reparte en el resto de los procesos (Durand, 2002).

Algunos estudios realizados en Cuba y el Caribe afirman que las precipitaciones presentan variaciones importantes, y que las tendencias climáticas observadas en las últimas décadas muestran un aumento de la frecuencia y la intensidad del fenómeno sequía, por lo que una

determinación rápida y acertada de su manifestación en espacio y tiempo resulta esencial para la reducción de los riesgos asociados con esta (Centella et al., 1997; Cutié, 2013). La precipitación en Cuba ha sido centro de atención de múltiples investigaciones. Las primeras, antes del triunfo de La Revolución, se realizaron por especialistas norteamericanos con la finalidad de la asimilación azucarera y en general de las riquezas nacionales. Es a partir del año 1962, con la creación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), que se comienzan a sistematizar las observaciones pluviométricas, según las normativas de un Servicio Hidrológico que respondiera a los intereses nacionales. Sin embargo, un recorrido por los estudios más antiguos ayuda a comprender la evolución de las investigaciones y a marcar la pauta de cualquier nuevo estudio. Los primeros estudios se realizaron en la década de los años 20 del siglo XX por investigadores norteamericanos. El primero de todos fue el de Oliver L. Fassig, quien en 1925 estudio las características de las lluvias y las temperaturas en Cuba. Uno de los instrumentos más utilizados para la medición de las precipitaciones son los pluviómetros. Estos sirven para calcular la cantidad de lluvia que cae en una zona concreta durante un período de tiempo determinado. Los primeros registros pluviométricos de los que se tiene constancia datan de la Grecia Clásica, hacia el 500 a.C. Unos cien años después, en la India, se utilizaban cuencos para registrar la lluvia caída.

Existen varios métodos para calcular la lluvia media caída sobre un área conocida, dentro de los cuales están los siguientes: El cálculo de las precipitaciones está dado por la aplicación de diferentes métodos, de ellos se encuentran entre los más utilizados a nivel mundial: Aritmético, Polígonos de Thiessen, Curvas Isoyetas y el Mapa Isoyético confeccionado para cada país.

El **método Aritmético** es de simple uso, rinde buenos resultados en terrenos montañosos si la red de pluviómetros es bastante densa y uniforme. El mismo se puede adaptar al procesamiento automático de datos. Además, garantiza resultados consistentes cuando los cálculos son realizados por diferente personal. Sin embargo, conduce a malos resultados si los pluviómetros son pocos y están mal distribuidos. Los pluviómetros localizados fuera de la cuenca son difíciles de tomar en cuenta y requiere una red densa para alcanzar la misma precisión de otros métodos.

Este método es el más simple pero el más inseguro de todos, que da unos buenos estimativos en áreas planas, si los pluviómetros están distribuidos uniformemente y el valor captado por

cada uno de los pluviómetros no varía mucho a partir de la media. Estas limitaciones se pueden prever si las influencias topográficas y la representatividad del área se consideran en la selección de los sitios en los cuales se van a ubicar los pluviómetros.

El método de Promedio Aritmético, consiste sencillamente en igualar la precipitación media caída sobre una cuenca al promedio aritmético de las lluvias registradas en los pluviómetros de la zona, o mejor dicho como su nombre lo indica, es el resultado obtenido al dividir la suma de las profundidades de agua caída de los registros de todas las estaciones pluviométricas, por el número de estaciones.

Por lo tanto, se deben considerar los valores de precipitación pluvial de las estaciones dentro y en límite de un área analizada o de una cuenca y no tomar en cuenta los valores de las estaciones circundantes que no caigan dentro del área considerada.

Si las estaciones están uniformemente distribuidas en la cuenca y la lluvia varia de una manera regular, el resultado obtenido por este método no difiere gran cosa del resultado obtenido por otro cualquiera. Sin embargo, como esta condición rara vez se cumple, el uso de este método no se recomienda, excepto para cálculos muy preliminares.

Por lo anterior, este método solo es aplicable a zonas planas donde las estaciones presenten una distribución uniforme y donde las lluvias registradas por cada pluviómetro no difieran mucho entre sí. También se necesitan condiciones homogéneas, donde no haya variabilidad de altura y diferencias de precipitaciones significativas. La fórmula general de éste método, es la siguiente:

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}$$

Donde:

P_m = Precipitación Media

P_1, P_2, P_n = Precipitación de los pluviómetros

n = Cantidad de pluviómetros con lecturas.

El **método Isoyético** teóricamente es el más exacto. Permite realizar una evaluación visual de la extensión y distribución de la precipitación. Los pluviómetros localizados a corta distancia de la cuenca pueden ser utilizados. Es adaptable para uso en grandes cuencas con red pluviométrica dispersa. No obstante, es el método más laborioso, depende enormemente de la

práctica y habilidad de la persona que realiza el análisis. Diferentes personas pueden obtener resultados distintos para los mismos datos y no es adaptable al procesamiento automático de datos.

Este método consiste en trazar curvas de igual precipitación para un periodo elegido. Los intervalos de profundidad de precipitación y de incremento de tiempo se toman de acuerdo a la necesidad del problema.

Las curvas isoyetas son líneas que unen puntos de igual cantidad de lluvia. Estas líneas se trazan interpolando los datos puntuales dados por los distintos pluviómetros con una técnica similar a la utilizada en topografía, y de acuerdo a las condiciones locales de la cuenca.

El trazado de las isoyetas debe considerar la variación de la precipitación con la altura y las condiciones sinópticas de la zona. Por medio de la planimetría se determina el área entre dos curvas isoyetas contiguas, y multiplicando por el valor de la isoyeta intermedia se define la cantidad de lluvia entre las dos isoyetas contiguas. La precipitación media para el área se calcula ponderando la precipitación media para el área se calcula ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas (por lo general tomando el promedio de dos valores de las isoyetas) por el área de las isoyetas, totalizando estos productos y dividiendo este por el área total.

El cálculo de las áreas como ya se indico puede realizar con el planímetro o pasando franjas de papel o superponiendo el mapa a un papel milimetrado (método de la cuadrícula).

Para trazar las isoyetas, se recomienda superponer la cuenca a un mapa con curvas de nivel, para tener en cuenta el efecto de la orografía, pues de otra forma no se diferencia mayormente de recurrir a interpolaciones lineales, sobre todo cuando se trabaja en zonas montañosas. Este método es el más preciso cuando el análisis de las curvas se hace debidamente.

El método de las isoyetas permite el uso y la interpretación de todo la información disponible y se adapta muy bien para discusión. En la construcción de un mapa de isoyetas, el analista puede utilizar todo su conocimiento sobre los posibles efectos orográficos y la morfología de la tormenta: en este caso el mapa final debe representar un patrón mucho mas real de la precipitación que aquel que se puede obtener utilizando únicamente las cantidades medidas. La exactitud del método de las isoyetas depende en gran parte de la habilidad del analista. Si se utiliza una interpolación lineal entre estaciones, el resultado será esencialmente el mismo que se obtiene utilizando el método de Thiessen. Además, un análisis inadecuado puede conducir a errores considerables.

El **método Polígonos de Thiessen** conduce a resultados usualmente más exactos que los obtenidos con el promedio aritmético, cuando se usa un buen número de estaciones. Permite además utilizar redes pluviométricas con distribución no uniforme. El mismo es adaptable al procesamiento automático de datos. Los pluviómetros localizados a poca distancia del parte aguas de la cuenca pueden ser utilizados. Resulta este método relativamente fácil de usar cuando los polígonos han sido cuantificados. Presenta como deficiencia que todos los polígonos deben ser nuevamente evaluados cuando la red cambia y no toma en cuenta las influencias topográficas, pues considera variación lineal de la lluvia entre pluviómetros. Implica más trabajo que el método aritmético.

Estos métodos dan un resultado que puede ser expresado en mm, cm o pulgadas de lluvia caída por un área específica, siendo los mm la dimensional más usada en los países latinoamericanos.

Este método es aplicable a zonas con una distribución irregular de estaciones y donde los accidentes topográficos no jueguen un papel importante en la distribución de las lluvias.

El método de Thiessen trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos. La precipitación media se determina como sigue:

- a) Se dibuja la zona en estudio con la ubicación exacta de las estaciones que contiene las circunvecinas.
- b) Se trazan las mediatrices (líneas perpendiculares bisectrices a las líneas de unión) de todos los lados, con lo que se formarán unos polígonos alrededor de cada estación se mide el área de otro método, y se expresa como un porcentaje del área total y su relación con el área total produce un coeficiente de ponderación para cada estación. Para el trazo de las mediatrices, existe una regla: “Tienen prioridad las mediatrices de las líneas de unión más cortas”, por lo tanto, las mediatrices de las líneas de unión más largas se consideran a veces.
- c) La lluvia media resulta de la sumatoria de los productos de las lluvias registradas en cada estación por el coeficiente de ponderación correspondiente, o como un promedio aritmético ponderado de acuerdo a las Áreas (A_1) de cada polígono, dándose por las siguientes formulas:

$$P_m = \frac{(P_1 \times A_1) + (P_2 \times A_2) + (P_3 \times A_3) + \dots + (P_n \times A_n)}{A_T}$$

Simplificando:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times A_i}{A_T}$$

Donde:

P_m = Precipitación media

P_i = Precipitación de cada estación contenida en un polígono.

A_i = Áreas parciales de cada polígono

A_T = Área total de la cuenca

La superficie de cada uno de estos polígonos, forman los factores A_i de ponderación de la fórmula y se mantienen invariables para una determinada cuenca mientras todas las estaciones aporten ininterrumpidamente sus datos. De esta manera se facilita el cálculo, pues basta multiplicar la precipitación caída durante un cierto intervalo de tiempo en un punto por el factor de ponderación de este punto o estación y sumarla a las estaciones restantes dividiendo finalmente la suma de estos productos por la superficie total de la cuenca. Para la determinación de los polígonos se aprovechan también las estaciones que están fuera de la cuenca, pero cerca de ella. Cuando en este caso se extienden los polígonos fuera del área considerada, se ocupa solo la parte del polígono que queda dentro de la cuenca.

Los resultados son por lo general más exactos que aquellos obtenidos por un simple promedio aritmético. La mayor limitación del método de Thiessen es su poca flexibilidad, puesto que se requiere un nuevo diagrama cada vez que hay un cambio en la red. El método tampoco tiene en cuenta influencias orográficas. En realidad, el procedimiento de Thiessen simplemente supone una variación lineal de la precipitación entre las estaciones y asigna un segmento del área a la estación más cercana.

1.1.2 Métodos estadísticos e hidrológicos empleados para la determinación de potenciales hídricos superficiales (Esguerrimiento superficial) en cuencas hidrográficas.

En nuestro país existen un gran número de cuencas sin estaciones hidrométricas, es decir, no tienen datos de esguerrimiento máximo. Otras, presentan datos faltantes que deben ser reconstruidos. Por ello de acuerdo con la disponibilidad o carencia de datos, se han

desarrollados diferentes tipos de métodos para el cálculo del escurrimiento máximo. Estos métodos son:

- Métodos estadísticos.
- Métodos hidrológicos.
- Formulas y métodos empíricos
- Método hidráulico de huellas máximas.
- Curva envolvente de los gastos máximos ($Q_{\text{máx}}$).

Cuando existen datos sobre el régimen hídrico de la corriente superficial investigada, o sea, existe una estación hidrométrica, siempre se pueden procesar los gastos máximos, observados mediante los métodos hidrológicos. Cuando no existen datos sobre el régimen hídrico de la corriente superficial investigada, caso muy común que se le presenta al ingeniero hidráulico en la determinación de la avenida de diseño, puede procesarse la tormenta de diseño para aplicarse los métodos empíricos y los métodos hidrológicos.

El coeficiente de escurrimiento es un valor adimensional que establece la relación fija entre la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje y el escurrimiento superficial y sub-superficial, depende de las características y condiciones de las cobertura del suelo, de la intensidad de la lluvia, proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, entre otras.

Debido al proceso complejo de conversión de la lluvia en escurrimiento superficial, se ha dado lugar a que se desarrolle una gran cantidad de métodos para calcular los escurrimientos a partir de lluvias. Los principales parámetros que intervienen en este proceso de conversión son: área de la cuenca, altura total de precipitación, características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.), distribución de la lluvia en el tiempo, distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca (Fuentes *et al.*; Aparicio; González).

Según Batista en los últimos 20 años el cálculo del escurrimiento medio anual para un período largo de tiempo se ha efectuado utilizando datos de observaciones hidrométricas cuando éstas existen, y en los casos de no disponer de la información necesaria, mediante la conocida ecuación del balance hídrico adaptada a las condiciones de Cuba, así como por fórmulas y ecuaciones deducidas a partir de los datos hidrológicos.

González considera que debido a su simpleza, las fórmulas empíricas tienen gran difusión pero pueden conducir a grandes errores, ya que el proceso de escurrimiento es mucho más

complejo como para simplificarlo en una expresión algebraica de tipo directo, en la que se implican el área de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento.

Pereyra y Hernández citados por González, indican que los modelos empíricos se basan en ecuaciones empíricas obtenidas en otros sitios, que relacionan las características más representativas de las tormentas, de las cuencas y de los hidrogramas de las avenidas, por ejemplo, relacionan el gasto máximo o gasto de pico del hidrograma con la intensidad media de la tormenta, el área de la cuenca, la pendiente media del cauce, etc., y se recomienda usarlos sólo cuando no sea posible utilizar métodos estadísticos o métodos hidrometeorológicos. Sobre el cálculo del escurrimiento, caudal o gasto máximo, Fundora (1989) expresa que es una de las tareas más complicadas y de mayor responsabilidad de la hidrología

Según Flores *et al.*, se reportan diversas metodologías para la evaluación del escurrimiento superficial y con el avance tecnológico de las computadoras y software, como SWAT, SWRRWB, ANSWER, WEPP, AGPNS, QUAL2E, PROUTE, se han generado modelos hidrológicos que estiman con bastante precisión los procesos involucrados en una cuenca. En países subdesarrollados, sin embargo, la aplicación de estos modelos hidrológicos es muy limitada por la falta de datos, tanto para calibrarlos, como en su validación.

Wisler precisaba que el uso de fórmulas empíricas debe estar precedido de una investigación sobre su origen, de una familiarización con los datos en los que se fundamentan, de un conocimiento de las condiciones bajo las que se intenta hacer uso de ellas y de las áreas a las que se aplican, así como, comprender las limitaciones que el uso de tales fórmulas han hecho sus autores. En la actualidad existen una gran variedad de métodos y fórmulas empíricas, pero el principal problema es la aplicación correcta de estas. (Hierrezuelo, 2016) .Algunos inconvenientes que podemos encontrar en su aplicación son:

1. El escurrimiento obtenido no está bien relacionado con su probabilidad de ocurrencia, pues algunos de estos métodos suponen que la probabilidad de ocurrencia del gasto corresponde a la probabilidad de ocurrencia de la lluvia.
2. Son métodos muy simples, por lo general, para representar todos los factores que influyen en la formación del escurrimiento.
3. Necesitan de una buena selección de los coeficientes que intervienen en la fórmula.

4. En algunos casos hay que corregir los coeficientes, ajustándolos a los valores reales de la cuenca, a partir de algún dato puntual conocido.
5. No se conocen, en algunos de ellos, las condiciones en que han surgido y por ende las limitaciones particulares para su aplicación.

Dentro de los métodos más conocidos y empleados a nivel internacional y en Cuba están:

- Método racional
- Método de las curvas numéricas.
- II Variante de José Luis Batista.
- III Variante de José Luis Batista.
- Fórmulas Clásicas.
- Fórmulas Hidro-meteorológicas
- Método de las isócronas.

Método racional

Wisler (1966) confirma que la formula racional es una de las más viejas y conocidas que ha sido utilizada en el diseño de conductos de aguas pluviales. La expresión de esta fórmula ha sufrido cambios en dependencia de las unidades de medida en que se ha expresado sus términos. Las norma cubana (CEN, 1984a) la expresa como:

$$Q_p = 166,67 * C * I_p * A$$

Donde:

C: Coeficiente de escurrimiento (adimensional).

I_p: Intensidad de precipitación, para la probabilidad dada (mm/min).

A: Área de la cuenca (Ha).

Q_p: Gasto o caudal para la probabilidad dada (L/s).

Se obtiene el valor del coeficiente de escurrimiento (C), de la tabla 1.3 de acuerdo con los tipos de suelos, uso del suelo y pendiente. Cuando el área de drenaje presenta diferentes tipos de suelos, vegetación y pendiente media. El coeficiente de escurrimiento (C), se obtendrá para cada área parcial y posteriormente se calculará el promedio ponderado para aplicarlo en la ecuación.

Tabla 1.3 Valores del coeficiente de escurrimiento según el método racional.

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Bosque			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Método de las curvas numéricas o del SCS (USA)

Para estimar el escurrimiento medio por evento y el máximo instantáneo se utiliza el método de las curvas numéricas, el cual utiliza los datos de precipitación por evento o la precipitación máxima para un periodo de retorno deseado y el máximo potencial de retención del agua del suelo como se presenta en la ecuación 4-3.

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + (0.8 S)} \quad (4-3)$$

$$Q > 0 \text{ si } 0.2 S \leq P$$

$$\text{si no } Q = 0$$

Dónde:

Q = Escurrimiento medio (mm).

P = Precipitación por evento (mm).

S = Retención máxima potencial (mm)

Como el potencial máximo de retención de agua del suelo (S) depende de las condiciones del suelo, vegetación y manejo del cultivo, entonces es factible relacionarlo con las curvas numéricas, las cuales son función de los factores antes mencionados

II Variante de José Luis Batista

Con el valor de la lluvia P_0 entramos a la tabla (ver anexos) y se busca el valor de U_1 para la región Oriental.

Se sustituyen los valores en la ecuación 1.1 y obtenemos la lámina de lluvia.

Este valor se sustituye en la ecuación 3.1 y obtenemos el escurrimiento medio anual:

$$W_0 = \frac{Y_0 * A_c}{1000} \quad (3.1)$$

Sustituyendo el valor de escurrimiento obtenido en la ecuación 3.2 y obtiene el valor de Q_0 :

$$Q_0 = W_0 * 31,54 \quad (3.2)$$

El módulo de escurrimiento se obtiene mediante la ecuación 3.3:

$$Q_0 = \frac{M_0 * A_c}{1000} \quad (3.3)$$

La II Variante de José Luis Batista es una de las más utilizada en, obteniéndose la variable normalizada de las precipitaciones y que está ajustada para períodos de estiaje y de corrientes permanentes, también existen las expresiones por regiones en el país.

$$U_0(Y_0) = f[0.897U_1(P_0)] \quad (1.1)$$

Y_0 - Lámina del escurrimiento medio anual

P_0 - Lluvia media hiperanual

U_0 y U_1 - Variables normalizadas de la lámina de escurrimiento y de la lluvia respectivamente.

En 1991, el ingeniero José Luis Batista propuso un método basado en la recopilación de los gastos líquidos de 58 estaciones hidrométricas por toda Cuba por un período de 25 años, comprendidos entre los años 1964 y 1988, a este método se le conoce como la III Variante de José Luis Batista, para este período concluyó que era suficiente puesto que dentro de estos años habían ocurrido años secos, medios y húmedos. En esta etapa el autor dedujo un sistema de ecuaciones para el cálculo del escurrimiento medio anual, dichas formulaciones las fraccionó por regiones (Occidental, Central y Oriental). (Hierrezuelo, 2016. Metodología para la determinación del escurrimiento medio anual de una cuenca).

Las correlaciones múltiples de escurrimiento, lluvia, área de la cuenca y altura media, resultan aceptables y presentan buenos coeficientes de correlación, pero las diferencias entre los datos observados con los calculados son considerables. Por esta razón, se ha estudiado la distribución físico-geográfica de las cuencas y el análisis de sus elementos principales (área de la cuenca, precipitación y altura media de la cuenca), llegando a los siguientes resultados:

1. Existe una buena correlación entre el módulo de escurrimiento medio anual (M_0) y las precipitaciones (P), pero ésta no es lineal, sino de tipo parabólico.

Teniendo en cuenta que en el trabajo anterior elaborado por el autor (1980) existía, en forma muy marcada, una diferenciación entre la región oriental y el resto del territorio cubano, se ha aplicado este mismo esquema para delimitar los puntos del gráfico y ver su agrupación geográfica, por tanto:

2. La correlación entre el módulo de escurrimiento medio anual (M_0) y las precipitaciones (P) para los ríos de las regiones Occidental y Central es más precisa que la obtenida para todo el territorio.
3. En la región Oriental deben considerarse dos relaciones $M_0=f(P)$, que se nombrarán: Oriental 1 y 2, la primera para $P < 1500$ mm y $H_m < 250$ m.s.n.m., la segunda (Oriental 2) acotada en $P > 1500$ mm y/o $H_m > 250$ m.s.n.m.
4. Se propone un sistema de ecuaciones de tipo parabólico para calcular el escurrimiento medio anual cuando no existan observaciones hidrométricas.

Existen diferentes métodos para determinar el escurrimiento medio (W_0) hiperanual en los ríos sin registros de observaciones, entre ellos se pueden mencionar algunos de mayor uso tradicionalmente en Cuba: “Mapas de Izolíneas del Escurrimiento”, I Variante Ing. José Luis Batista, II Variante Ing. José Luis Batista, III Variante Ing. José Luis Batista, Abel Alfonso, Nadir Fernández, Métodos Genéticos, Balance Hídrico, las Fórmulas Clásicas, las Fórmulas Hidro-meteorológicas, Analogía y Modelos Matemáticos e Hidrológicos, este último se encuentra en procesos y aplicaciones investigativas con resultados satisfactorios en cuencas muy específicas (Durand, 2017) por lo que se determinó obtener el escurrimiento medio por cuatro métodos: la II y III Variante del Ing. José Luis Batista, las Fórmulas Clásicas y las Fórmulas Hidro-meteorológicas para la cuenca a partir de la lluvia obtenida por la última versión del isoyético (1961-2000) y el C_v se obtuvo por la expresión de Riazanov:

$$C_v = 0,95 - 0,36 * \log M_0 \quad (1.2)$$

Donde:

M_0 es el módulo del escurrimiento expresado en $l/s/Km^2$, de ahí el Volumen de escurrimiento en $10^6 m^3$ y el gasto en m^3/s .

III Variante de José Luis Batista: Utilizando la ecuación 3.4 y con el valor de la lluvia media anual de la cuenca, se calcula el valor del módulo de escurrimiento de la cuenca:

$$M_0 = 2.53P^{2.72} * 10^{-8} \quad (3.4)$$

Este resultado se sustituye en la ecuación 3.5 y se obtiene el gasto:

$$Q_0 = \frac{M_0 * A_c}{1000} \quad (3.5)$$

Este valor se sustituye en la ecuación 3.6 y se obtiene el escurrimiento:

$$W_0 = Q_0 * 31.54 \quad (3.6)$$

Con el resultado del escurrimiento y el área de la cuenca se sustituye en la ecuación 3.7 y se determina la lámina de escurrimiento:

$$Y_0 = (W_0/A_c) * 1000 \quad (3.7)$$

Fórmulas Clásicas.

Con el valor del coeficiente de escurrimiento, el de precipitación media de la cuenca y el área de la cuenca, se sustituye en la ecuación 3.8 y se obtiene el escurrimiento medio:

$$W = \frac{C * P * A}{1000} \quad (3.8)$$

El caudal se obtiene sustituyendo el valor de escurrimiento en la ecuación 3.9:

$$Q_0 = W_0/31.54 \quad (3.9)$$

El módulo de escurrimiento se determina a partir de la ecuación 3.10 sustituyendo los valores de caudal y área de la cuenca:

$$M_0 = (Q_0/A_c) * 1000 \quad (3.10)$$

Se sustituyen los valores de escurrimiento y área de la cuenca en la ecuación 3.11 y se obtiene la lámina de escurrimiento:

$$Y_0 = (W_0/A_c) * 1000 \quad (3.11)$$

Fórmulas Hidro-meteorológicas.

Sustituyendo el valor de la lluvia en la ecuación 3.12, se calcula la lámina de escurrimiento:

$$Y_0 = (0,845 * P_0) - 759,7 \quad (3.12)$$

Seguidamente se sustituyen los valores de lámina de escurrimiento y área de la cuenca en la ecuación 3.13 y resulta el valor de escurrimiento:

$$W_0 = \frac{Y_0 * A_c}{1000} \quad (3.13)$$

Con el escurrimiento se calcula en la ecuación 3.14 el gasto:

$$Q_0 = W_0/31.54 \quad (3.14)$$

El módulo de escurrimiento se obtiene a partir de la ecuación 3.15 con la sustitución de los valores de caudal y área de la cuenca:

$$M_0 = (Q_0/A_c)*1000 \quad (3.15)$$

Método de las isócronas. Según expresa González (2000) el método de las isocronas se basa en el comportamiento del escurrimiento en una cuenca como repuesta a la ocurrencia de un aguacero. El escurrimiento llega a un punto o al cierre de una cuenca en instantes diferentes, cuando procede de lugares de lugares distintos de la cuenca de drenaje. El agua que aparece primeramente en la crecida de la corriente proviene de un área próxima al punto de concentración o cierre. El agua que proviene de las áreas más extensas, de la parte más central de la cuenca, llega más tarde, y finalmente llega el agua que proviene de las partes más alejadas de la misma. En consecuencia, el área de la cuenca puede dividirse en zonas de las que llega el agua, sucesivamente, al punto de concentración. Las líneas que separan estas zonas se denominan isocronas, que no son más que líneas de igual tiempo de concentración (etc.). El método de las isocronas permite tener en cuenta una distribución no uniforme de lluvia cuando existen suficientes pluviómetros en una cuenca como para delinear una configuración de lluvia que sea confiable. Esto significa una ventaja sobre el hidrograma unitario, en el cual la distribución relativa de escurrimiento se calcula para crecidas individuales, causadas por distribuciones uniformes o típicas de la lluvia para una duración específica (González 2000). El método de la isocronas, para estimar las ordenadas del hidrograma de una avenida producto de una lluvia que ocurra en la cuenca, necesita los datos siguientes:

- Un plano cartográfico con curvas de nivel.
- El histograma de intensidades de la lluvia neta.
- Características físicas de la cuencas

La ecuación básica para hallar el componente de gasto (Q_i , producto de una intensidad de lluvia neta (I_n) en un área determinada (A_i), será:

$$Q_i = I_n * A_i$$

Para aplicar el método necesario descomponer la superficie de la cuenca en un cierto número de zonas ($A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$) limitadas por las isócronas, de forma que una gota de agua de agua

que caiga en esas zonas tarde en llegar a la salida de la cuenca tiempos sucesivos de valor t , $2t$, $3t$... nt , siendo t la unidad de tiempo considerada. La distribución de las áreas entre isócronas (distribución área-tiempo) se considera constante para una cuenca dada y para todos los hidrogramas de crecidas. En relación con el cálculo de dicha distribución se hace determinar, o en su defecto asumir, un tiempo medio de recorrido (t_r) o una velocidad media del flujo de la corriente.

Considerando un tiempo medio de recorrido, se calcula desde diferentes zonas el tiempo que demora el agua en llegar al cierre y de esa forma se llena el área de la cuenca de puntos con tiempo de recorridos conocidos. Logrando hallar a sí el tiempo que tarda en llegar al agua al cierre estudiado, desde una serie de puntos con los que, a semejanza de las curvas de nivel de un levantamiento topográfico, se dibujan las curvas isócronas. (González, 2000).

Recomendaciones prácticas para el trazado de las curvas isócronas:

- Seleccionar un plano cartográfico con curvas de nivel, con escalas entre 1:2000 hasta 1:50000, según el área de la cuenca.
- Delimitar el sistema fluvial de la cuenca teniendo en cuenta el cauce principal y sus afluentes, o en caso de drenaje urbano, el recorrido del agua por la ciudad.
- Estimar el tiempo de concentración de la cuenca por algunas de las ecuaciones descritas por el método racional.
- Las isócronas se trazan sobre un mapa de la cuenca de acuerdo con la velocidad media de la corriente en el curso de agua o con el tiempo medio de recorrido.
- Para definir puntos por toda la cuenca con estimados de tiempo medio de recorrido, se determina el tiempo de recorrido por los cauces desde varios puntos de la cuenca hasta el cierre, usando algunas de las fórmulas de tiempo de concentración. Se pueden incorporar también puntos intermedios ubicados fuera de los cauces.
- Escoger un intervalo Δt , submúltiplo del tiempo total de concentración de la cuenca, para el trazado de las curvas. En cualquier caso, el intervalo del tiempo separación entre isocromas debe calcularse de forma tal que el número de formas delimitadas sea mayor de cinco, como mínimo.
- Las isócronas cortan ortogonalmente a los cauces, presentando su concavidad hacia abajo, y las divisorias formando ángulos agudos hacia arriba.

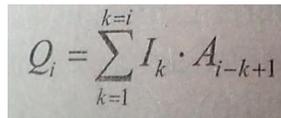
- Si una isócrona llega a una divisoria parcial o total, sigue por la divisoria hasta encontrar la misma isócrona de la cuenca vecina, si antes no tiene que cortar a otra isócrona; en caso contrario, sigue por la divisoria hacia aguas abajo hasta encontrar la inmediata superior.

El trazado de las curvas isócronas define la distribución tiempo-área de la cuenca y es definitoria del hidrograma para lluvia uniforme de duración unitaria (Δt), siendo esta la diferencia de tiempo entre isócronas.

Determinación de las ordenadas de gasto del hidrograma.

En el caso de que el hidrograma de la lluvia neta sea compuesto, o sea, formado por periodos de lluvia de intensidades diferentes, las ordenadas de gasto del hidrograma de avenida se estiman por la ecuación general:

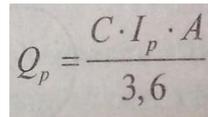
$$Q_i = I_1 \cdot A_i + I_2 \cdot A_{i-1} + I_3 \cdot A_{i-2} + [\dots] + I_i \cdot A$$


$$Q_i = \sum_{k=1}^{k=i} I_k \cdot A_{i-k+1}$$

Donde:

A_i : Áreas parciales entre curvas isócronas.

I_k : Intensidades de la lluvia neta o lluvia en exceso, a la probabilidad de diseño, ocurrida en un intervalo de tiempo específico de simultaneo en toda la cuenca. Se determinan por el hidrograma de lluvia neta.


$$Q_p = \frac{C \cdot I_p \cdot A}{3,6}$$

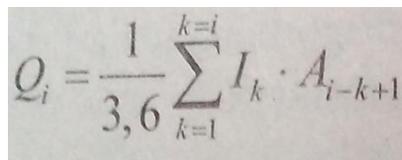
Donde:

I_p : Intensidad de la precipitación para a probabilidad dada en (mm/h).

A : Área de la cuenca (km^2).

Q_p : Gasto o caudal para la probabilidad dada (m^3/s).

Por lo que, sobre la base de la ecuación anterior, se puede definir como una ecuación particular para estimar las ordenadas de gasto del hidrograma de avenida, la siguiente:


$$Q_i = \frac{1}{3,6} \sum_{k=1}^{k=i} I_k \cdot A_{i-k+1}$$

Donde:

I_k : Intensidades de la lluvia neta o lluvia en exceso, a la probabilidad de diseño (mm/h).

A_i : Áreas parciales entre curvas isocronas (km^2).

Qi: Gasto o caudal para la probabilidad dada (m³/s).

1.2 Estado de la determinación de los potenciales hídricos superficiales en cuencas hidrográficas internacionalmente y en Cuba.

La consulta bibliográfica realizada confirma que tanto internacionalmente como para el caso de las cuencas hidrográficas cubanas, en la mayoría se conoce el potencial de escurrimiento medio de las cuencas en su cierre general de zona costera, y en varios casos para cierres de subcuencas o microcuencas, sobre todo por necesidad de diseños anteriores para la construcción de presas y centrales hidroeléctricas; así como para su explotación directa para los diferentes consumos que demanda la sociedad y la economía.

Particularmente para la parte Sur este de la provincia Santiago de Cuba, previamente en el año 2018 fueron determinados los potenciales hídricos superficiales de las cuencas que están presentes en esta región para los cierres costeros (Tabla 1.4), confirmando la necesidad de detallar cuenca arriba sus valores.

Tabla 1.4: Precipitación y escurrimiento medio por cuencas hidrográficas. Durand, 2017.

Cuencas	Lluvia media	Yo	Wo	Qo	Mo	Cv
San Juan	1190	220	30.36	0.96	7	0.65
Sardinero	1060	112	2.06	0.0165	3.5	0.75
Justicí	1100	116	0.16	0.005	3.57	0.75
Carpintero	1220	169	2.7	0.086	5.4	0.69
Juraguá	950	378	8.45	0.268	12	0.56
Arenas	1300	267	4.35	0.138	8.5	0.61
Magdalena	1320	279	9.23	0.29	8.9	0.61
Duarte	960	450	1.17	0.037	12	0.56
Guinea	900	434	1.13	0.036	13	0.55
Cajobabo	1000	613	2.21	0.007	14	0.54
Uvero 1	940	1277	2.81	0.089	11	0.57
Sigua	940	404	18.95	0.601	13	0.55
Baconao	1330	284	70.43	2.23	9	0.61

Como se puede observar estos estudios están incompletos y sujetos a determinados objetivos, lo que no satisface la necesidad actual planteada en el programa de aprovechamiento hidroenergético y cambio de la matriz energética de la nación, el cual necesita sean estudiadas todas las cuencas detalladamente, identificando además sus valores en subcuencas, microcuencas y afluentes posibles, lo cual constituye la base, no solo para la producción de hidroenergía, sino también para la correcta administración y gestión del recurso agua para otros usos sociales y económicos.

1.3 La representación espacial de cuencas hidrográficas con el uso de SIG.

Recientemente la fotografía aérea y particularmente las imágenes de satélite han permitido la observación periódica de los fenómenos sobre la superficie de la corteza terrestre. La información producida por este tipo de sensores ha exigido el desarrollo de herramientas para lograr una representación cartográfica de este tipo de información. El medio en el cual se desarrollaron estas herramientas tecnológicas correspondía las ciencias de teledetección, análisis de imágenes, reconocimiento de patrones y procesamiento digital de información, en general estudiadas por físicos, matemáticos y científicos expertos en procesamiento espacial. Con el transcurso del tiempo se ha logrado desarrollar un trabajo multidisciplinario y es por ésta razón que ha sido posible pensar en utilizar la herramienta conocida como "Sistemas de Información Geográfica, SIG (GIS). El primer SIG conocido fue el Canadian Geographics Information System (CGIS) en el año 1962 y estuvo concebido para el manejo de los recursos naturales. En la década de los años 60's y 70's del siglo XX surgieron otros como el Sistema de Información de Manejo Territorial de Minnesota en 1969 en EEUU. En este período se empezó a aplicar la tecnología digital al desarrollo de los procesos de la naturaleza. Excluyendo cambios estructurales en el manejo de la información, la mayoría de programas estuvieron dirigidos hacia la automatización del trabajo cartográfico, algunos pocos exploraron nuevos métodos para el manejo de información espacial y se siguieron básicamente dos tendencias:

- Producción automática de dibujos con un alto nivel de calidad pictórica
- Producción de información basada en el análisis espacial pero con el costo de una baja calidad gráfica.

En la actualidad los SIG a nivel mundial tienen una aplicación de gran importancia. Con la ayuda de los software SIG los cuales tienen como virtud principal el almacenamiento y procesamiento de datos para la ejecución y prevención de fenómenos tanto de carácter natural como físicos, el desarrollo de estos programas ganan cada día más un paso significativo dentro del campo de la informática.

Para el caso de los estudios hidrológicos hoy día Herramientas SIG como Hecras, Arcview, ArcGIS, Emcom discover y Vertical Mapper (Mapinfo), otros programas especializados, poseen aplicaciones para representar geográficamente de cierta forma parámetros hidrológicos como las precipitaciones medias, inundaciones, entre otros.

Los SIG incluyen además herramientas de procesamiento estadístico y matemático que permiten a partir de determinados parámetros representados geográficamente, e introduciendo las formulaciones adecuadas, obtener nuevos valores deseados que muchas veces son calculadas manualmente; permitiendo así automatizar estas determinaciones.

Como se puede observar los SIG representan espacialmente distintos fenómenos o elementos de la realidad, para ello emplean métodos estadísticos reconocidos en la literatura internacional e incluidos en sus herramientas internas de trabajo, con los cuales se puede llegar a estimar valores no conocidos espacialmente, a partir de valores conocidos o calculados para las variables objeto de análisis en determinadas coordenadas geográficas. De esta manera finalmente se logra interpolar y obtener mapas en formato raster y vectorial.

Las ventajas en la aplicación de uno u otro método en la representación espacial depende de varios factores, en los que predominan el tipo de variable analizada, la precisión con que se desea estimar los valores espaciales y el criterio de los especialistas que realizan el proceso.

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR y REPRESENTAR ESPACIALMENTE EL POTENCIAL HIDRICO SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

Toda investigación científica está avalada por un diseño teórico que presupone los principios de interconexión, así como de las etapas que deben seguirse en aras de lograr los objetivos deseados. En el caso específico de esta investigación se sigue un procedimiento que está basado en el uso de métodos indirectos para la determinación del potencial hídrico superficial, conformado por los pasos expuestos en la figura 2.1

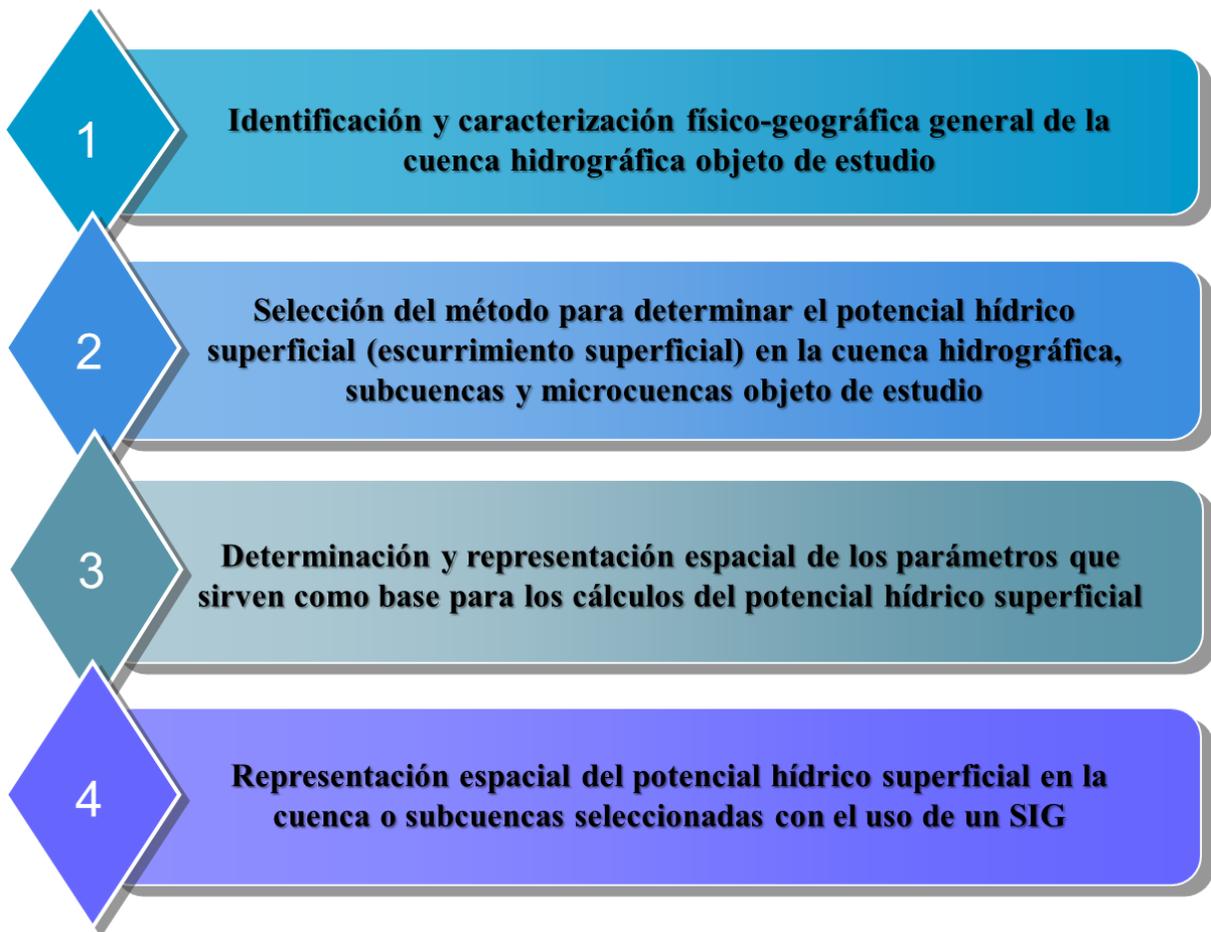


Figura 2.1 Esquema del procedimiento a seguir para determinar y representar el potencial hídrico superficial en cuencas hidrográficas.

2.1 Identificación y caracterización físico-geográfica general de la cuenca hidrográfica objeto de estudio.

Las características físicas, geomorfológicas de la cuenca dependen de su estructura geológica, del relieve de la superficie terrestre, el clima, el tipo de suelo, la vegetación y, cada vez en mayor medida, de las repercusiones de la acción humana en el medio ambiente de la cuenca. A

continuación se hace referencia a las principales características físicas geográficas de una cuenca que deben describirse para tener el mayor volumen de información posible sobre esta:

- **Divisoria de aguas:** La divisoria de aguas o parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico que sirve para delimitar la cuenca hidrográfica y/o separar una cuenca de las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria de aguas desemboca generalmente en ríos distintos. La divisoria de aguas de la cuenca se puede trazar indicando la longitud y latitud de los puntos más altos a lo largo de ésta, asumiendo que entre ellos la línea que los une es una línea recta
- **Perímetro de la cuenca:** El perímetro de la cuenca se refiere a la longitud de la divisoria de aguas. Es característico para cada cuenca, pues su magnitud será diferente aun cuando su área sea igual a otra.
- **Área de la cuenca:** El área de la cuenca está definida como la proyección horizontal de toda la cuenca delimitada por la divisoria de aguas, conocida también como área de recepción o drenaje. Se expresa en hectáreas si la cuenca es pequeña o en kilómetros cuadrados cuando es mayor, generalmente se trabaja con una sola cifra decimal. Para el cálculo de las áreas se utilizaba el planímetro; sin embargo actualmente se usan más las computadoras para hallar este parámetro apoyados en fotografías satelitales
- **Ancho de la cuenca:** El ancho se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca y está expresado en unidades de longitud.
- **Río principal:** El río o corriente principal de una cuenca se define como el curso que pasa por la salida de la misma, el de mayor caudal (medio o máximo), o bien el de mayor longitud o mayor área de drenaje. Estos conceptos son más bien arbitrarios y solamente aplicables a cuencas exorreicas.
- **Afluentes:** Las corrientes tributarias o afluentes son los ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, denominada sub-cuenca. Entre más afluentes tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación.
- **Longitud de la cuenca:** La longitud de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del curso del río principal entre la desembocadura (estación de aforo) y un punto aguas arriba de la naciente donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (divisoria de aguas).

- **Subcuencas y microcuencas:** La división en subcuencas y microcuencas es importante en los estudios hidrológicos detallados, debido a que permite la obtención de los distintos parámetros objeto de estudio en ellas.
- **Coefficiente de compacidad:** El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius está definido como la relación entre el perímetro (P) de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área (P₀). Se le suele representar como (k₀)

$$K_c = 0.282 * P / \sqrt{A}$$

Donde: P y A son el perímetro y la superficie de la cuenca, respectivamente. Este coeficiente es igual a uno cuando la cuenca es perfectamente circular, cuando IQ es igual a 1.128, se trata de una cuenca cuadrada. Este coeficiente puede alcanzar el valor de tres en el caso de cuencas muy alargadas.

- **Relieve de la cuenca:** El relieve de una cuenca consta de los valles principales y secundarios, con las formas de relieve mayores y menores y la red fluvial que conforma una cuenca. Está formado por las montañas y sus flancos; por las quebradas o torrentes, valles y mesetas. Es muy importante ya que puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma misma de la cuenca e influye en la determinación de las pendientes.
- **Curva hipsométrica:** La curva hipsométrica es un parámetro relativo al relieve de la cuenca que representa la variación entre la altitud o cota y el área drenada por debajo o por encima de dicha altitud. La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en km² o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros.
- **Polígono de frecuencias:** El polígono de frecuencias o diagrama de frecuencias altimétricas es un gráfico de barras que indica las superficies expresadas en porcentaje del total comprendidas en intervalos constantes de altura (msnm). Sirve para encontrar el área parcial más frecuente para el posible desarrollo de proyectos agrícolas y/o habilitaciones poblacionales.
- **Rectángulo equivalente:** Este parámetro expresa el comportamiento hidrológico de una cuenca mediante un rectángulo de igual área y perímetro e igual distribución de alturas (o sea igual curva hipsométrica). Se trata en consecuencia de una transformación puramente geométrica de la cuenca en un rectángulo de igual área y perímetro, con lo

que las curvas a nivel (o cotas) se convierten en rectas paralelas a los lados menores, siendo éstos últimos la primera y última curva de nivel.

En este epígrafe, además, se realiza una descripción general de elementos como ubicación de las cuencas hidrográficas, caracterización pluviométrica general, tipos de suelos, rocas, población, entre otros datos de interés que sirvan para ubicar a los especialistas. Si se tienen estudios previos, deberán también reflejarse en los informes.

2.2 Selección del método para determinar el potencial hídrico superficial (escurrimiento superficial) en la cuenca hidrográfica, subcuencas y microcuencas objeto de estudio.

La determinación del potencial hídrico superficial en la región en estudio específicamente, se realizará por los métodos descritos con anterioridad en el capítulo 1, y su selección dependerá de las condiciones e informaciones básicas disponibles:

- Método racional
- Método de las curvas numéricas.
- II Variante de José Luis Batista.
- III Variante de José Luis Batista.
- Fórmulas Clásicas.
- Fórmulas Hidro-meteorológica.
- Método de las isócronas.

2.3 Determinación y representación espacial de los parámetros que sirven como base para los cálculos del potencial hídrico superficial.

Específicamente para la determinación del potencial hídrico superficial, la mayoría de los métodos exigen parámetros como los siguientes:

- Determinación de cierres óptimos
- Determinación de las lluvias netas en los cierres seleccionados
- Determinación del área de las cuencas
- Longitud del perímetro
- Longitud del río principal y sus afluentes
- Determinación de las pendientes medias
- Factor de rugosidad de los suelos

En el caso de los SIG, una vez obtenido el mapa topográfico digitalizado, es posible a través de herramientas internas, modelar el relieve y obtener el Modelo Digital de Elevación (MDE),

que consecutivamente permite también obtener el Modelo Digital de Pendientes (MDP) (Figura 2.2)

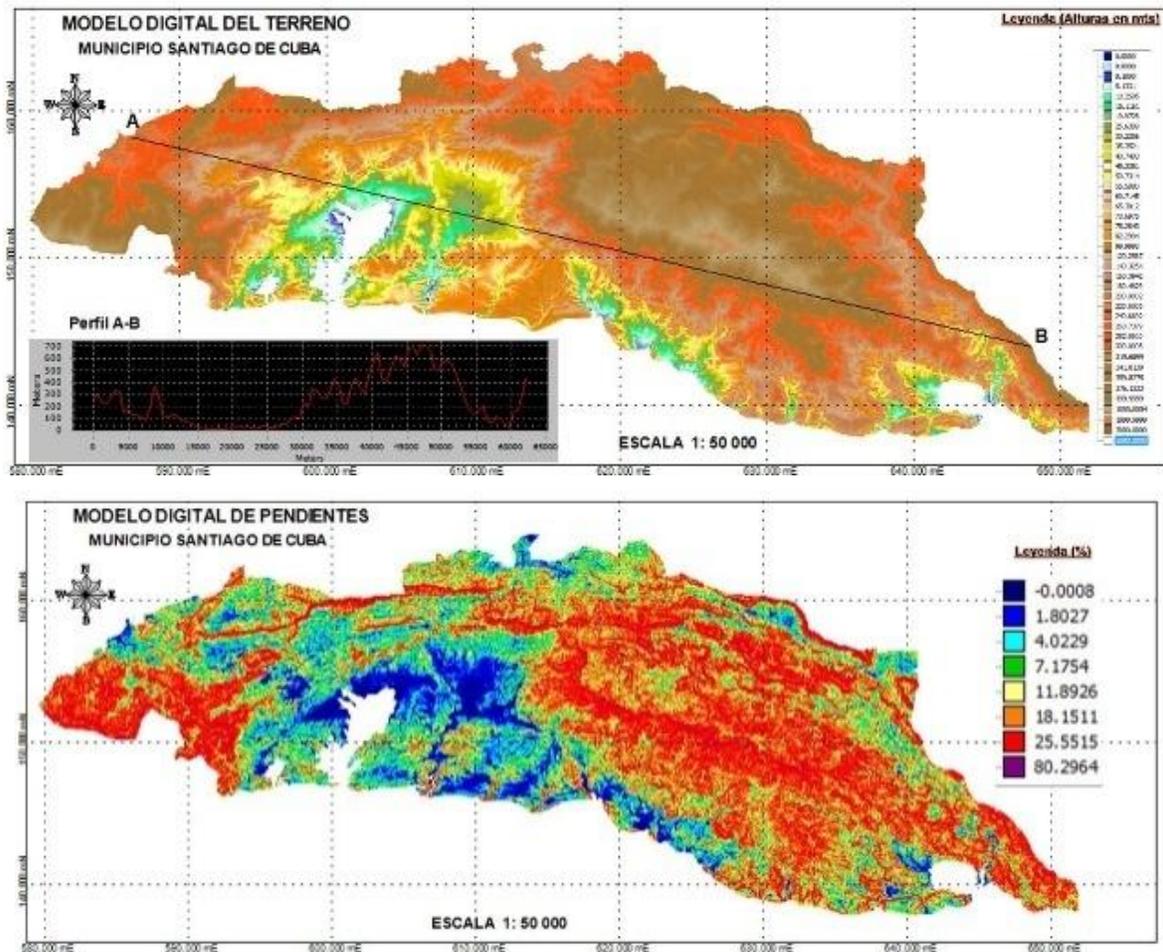


Figura 2.2 Modelo digital de elevación y de pendientes del municipio Santiago de Cuba. Galbán, 2014.

Hoy día para delimitar las cuencas, y las subcuencas y micro cuencas que las componen se emplea el MDE, debido a la facilidad con que se puede trazar la línea perimetral. Consecutivamente los SIG, una vez delimitada la cuenca ofrecen en su mayoría tanto el área total delimitada como la longitud del perímetro de forma automatizada, humanizando el trabajo de los especialistas. (Figura 2.3)

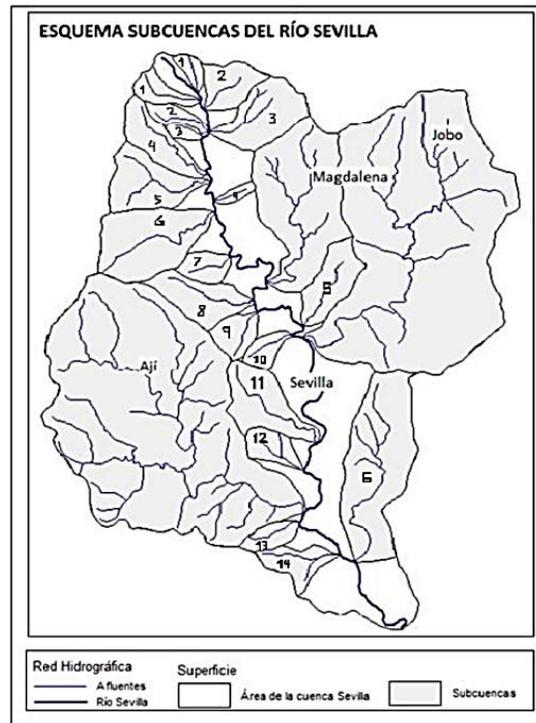


Figura 2.3 Ejemplo de delimitación en Subcuencas del río Sevilla, Santiago de Cuba con el empleo de un SIG. Fuente: Ramos, 2018.

Para la determinación y representación espacial de las lluvias netas en los cierres seleccionados pueden emplearse los distintos métodos descritos en la literatura (referidos en el capítulo 1: Método Aritmético, método Isoyético, Método de Polígonos de Thiessen, entre otros.). De igual forma pueden emplearse los datos aportados por el mapa isoyético nacional, rectificado con los valores de estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca en proceso de análisis. (Figura 2.4)

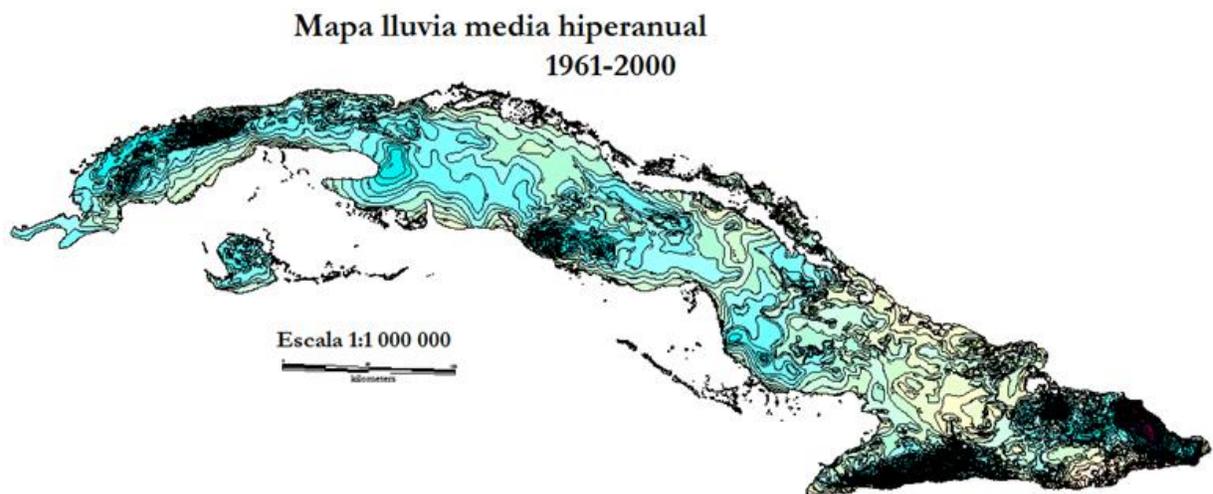


Figura 2.4 Imagen del Mapa isoyético nacional de Cuba. Fuente: CITMA, 2002.

La identificación y representación espacial del factor de rugosidad de los suelos, puede obtenerse a partir de distintas informaciones básicas, entre ellas: la geología, el mapa de suelos agrícolas digitalizado, de uso de suelos y mapa de vegetación. Se determinan los valores combinando los elementos que brinda cada cartografía, designando finalmente el valor a cada área analizada según las proposiciones realizadas por los distintos especialistas.

2.4 Representación espacial del potencial hídrico superficial en la cuenca o subcuencas seleccionadas con el uso de un SIG

Una vez obtenida la representación espacial de los parámetros básicos, se procede a la representación espacial del potencial Hídrico superficial de la cuenca. Para ello los SIG poseen dentro de sus herramientas de procesamiento espacial unas calculadoras, donde se sustituyen los valores de las formulaciones originales por los nombres de las capas o mapas obtenidos con la representación espacial de los parámetros básicos, y a través del comando aceptar la calculadora procesa y emite un mapa resultante, que en nuestro caso sería el de los potenciales hídricos superficiales detallados en cada punto del río o de la cuenca. (Figuras 2.4 y 2.5)

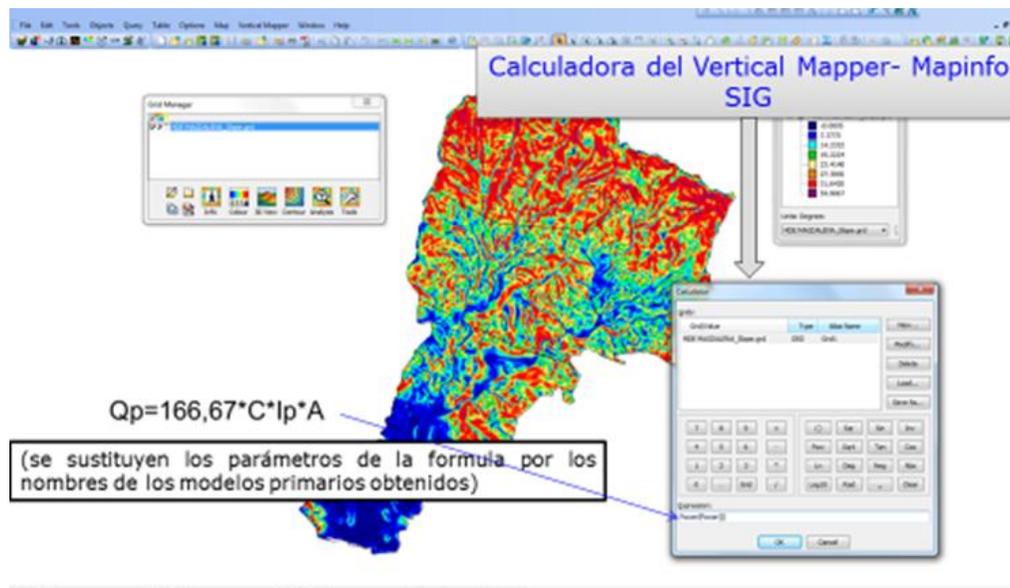


Figura 2.4 Imagen donde se muestra una de las calculadoras de capas o mapas en un SIG. En este caso de la herramienta Vertical Mapper- SIG Mapinfo.

Posteriormente, con la ayuda del cursor, el especialista se puede mover en el mapa y obtener en cualquier momento y lugar este valor. (Ver figura 2.5)

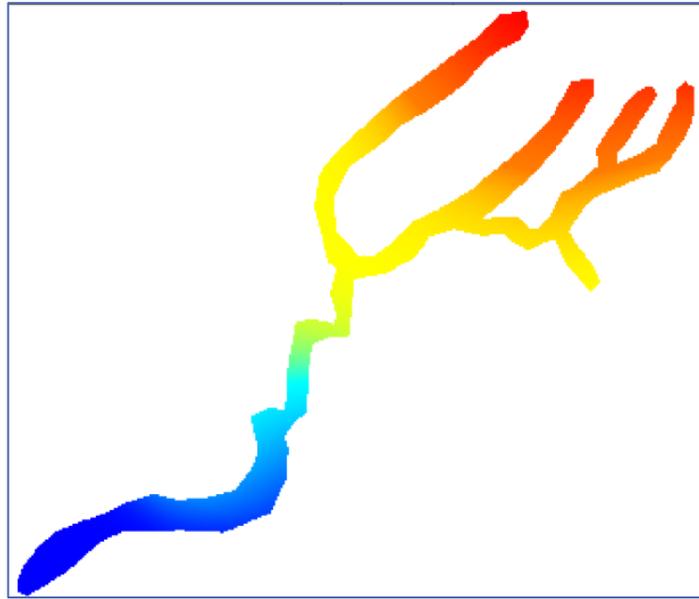


Figura 2.5 Ejemplo de modelo de un río perteneciente a una cuenca hidrográfica donde se obtiene por variación de colores los valores del potencial hídrico superficial, que finalmente deberá ser acompañado de la leyenda y atributos de cartografía.

CAPÍTULO 3: EL POTENCIAL HIDRICO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO MAGDALENA EN SANTIAGO DE CUBA.

En este capítulo se desarrolla la evaluación y representación espacial del potencial hídrico superficial; para ello se seleccionó el SIG Mapinfo v10.5, y su herramienta de modelación y análisis espacial Vertical Mapper v3.0. A continuación se exponen los resultados obtenidos.

3.1 Identificación y caracterización físico-geográfica general de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena.

La cuenca hidrográfica del Río Magdalena se encuentra ubicada al Este de la ciudad de Santiago de Cuba en el municipio de igual nombre, en la zona conocida como Parque Nacional Gran Piedra (Figura 3.1), donde se encuentran varias cuencas hidrográficas y para las cuales fue determinado anteriormente este potencial hídrico en sus cierras, no así en el trayecto del río cuenca arriba (Tabla 3.1)

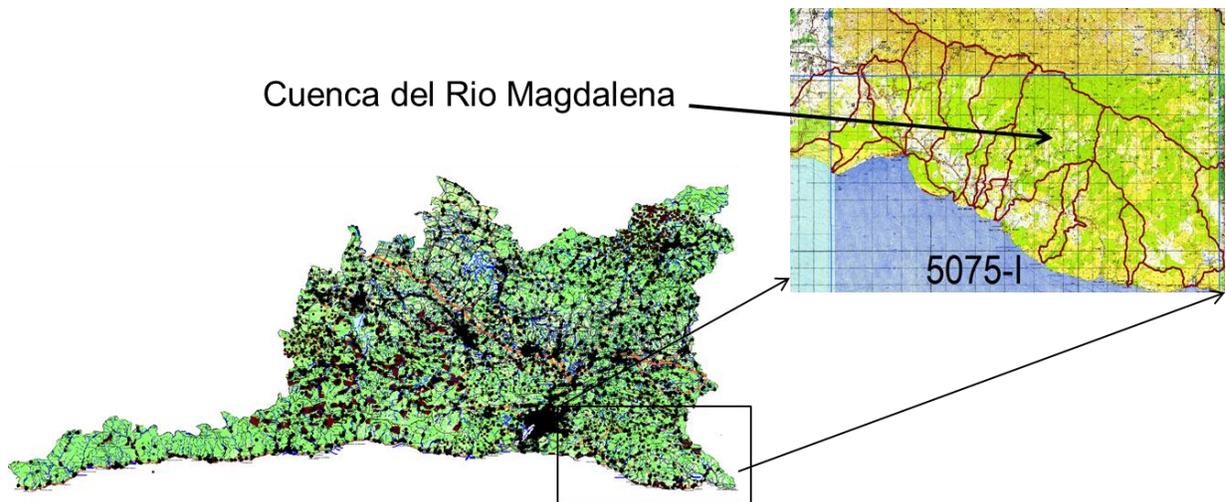


Figura 3.1 Ubicación general de la cuenca del río Magdalena.

Tabla 3.1. Características morfométricas generales de las cuencas ubicadas en la parte Este del municipio Santiago de Cuba. Fuente: Durand, 2017.

Cuencas	Coordenadas		Ac Km ²	Hm m	Yc o/oo	Yr o/oo	Dd Km/km ²	Lr Km	H1 m	H2 m	Clasif
	N	E									
San Juan	146.5	605.6	138	144	184	9.9	1.06	27.0	220	0	P
Sardinero	145.5	609.7	18.4	57	95	10.9	0.89	9.1	99	0	P
Justicí	144.8	613.2	2.8	60	58	13.3	0.85	6.0	80	0	I
Carpintero	145.5	618.3	16	319	302	72.7	1.21	8.8	640	0	I
Juraguá	143.4	621.4	22.3	251	274	76.5	1.12	12.3	940	0	P
Arenas	142.7	622.5	16.3	389	387	67.9	1.16	10.6	720	0	P

Evaluación y representación espacial del potencial hídrico superficial de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena

Cuencas	Coordenadas		Ac Km ²	Hm m	Yc o/oo	Yr o/oo	Dd Km/km ²	Lr Km	H1 m	H2 m	Clasif
	N	E									
Magdalena	148.3	624.2	33.1	374	359	40.4	1.20	13.1	780	0	P
Duarte	144.0	625.2	2.6	120	140	80.0	0.90	5.0	240	0	I
Guinea	140.3	626	2.6	90	100	35.0	0.90	4.0	160	20	I
Cajobabo	139.2	627.8	3.6	160	200	45.3	0.95	7.5	340	0	I
Uvero 1	138.0	625.5	2.2	110	100	37.5	0.95	4.0	150	0	I
Sigua	137.9	637.8	46.9	255	311	37.4	1.25	19.3	720	0	I
Baconao	139.3	645.1	248	418	360	9.9	1.05	73.8	730	0	P

Leyenda:

A - Área de la cuenca en Km²

Hm- Altura media de la cuenca en m

Lr – Longitud del río en Km

H1 – Cota del nacimiento del río en msnm

H2- Cota de la desembocadura del río msnm

Yr- Pendiente del río e o/oo

Yc – Pendiente media de la cuenca o/oo

Dd – Densidad de Drenaje Km/Km²

La clasificación de las corrientes identifica si son permanentes (P) o intermitentes (I)

El clima del territorio es tropical, aunque al estar situado al sur de la Sierra de la Gran Piedra, predominan las condiciones de sequedad. La más extensa serranía cubana sirve de barrera natural a los vientos alisios que vienen cargados de humedad desde el Océano Atlántico. Al encontrarse con estas montañas, se ven obligados a elevarse, por tanto se condensan y se precipitan en su ladera norte, y al descender secos por la ladera sur, lugar donde se encuentra la localidad, lo propician mayores condiciones de sequedad. La temperatura promedio es de 26 grados Celsius siendo ligeramente más bajas en las zonas altas.

Los factores que determinan en lo fundamental la vida vegetal de este territorio, así como de toda la Sierra de la Gran piedra, son el relieve y la distancia al mar.

Debido a las características del territorio y a la presencia de la Sierra de la Gran piedra, las redes hidrográficas son pequeñas, y en ocasiones aparecen diminutas cuencas que pertenecientes a ríos intermitentes. Los ríos son cortos, de escaso caudal y torrenciales. En la época de lluvia crecen, y pueden arrasarse con todo lo que encuentren a su paso, comunicando diversas comunidades de la serranía.

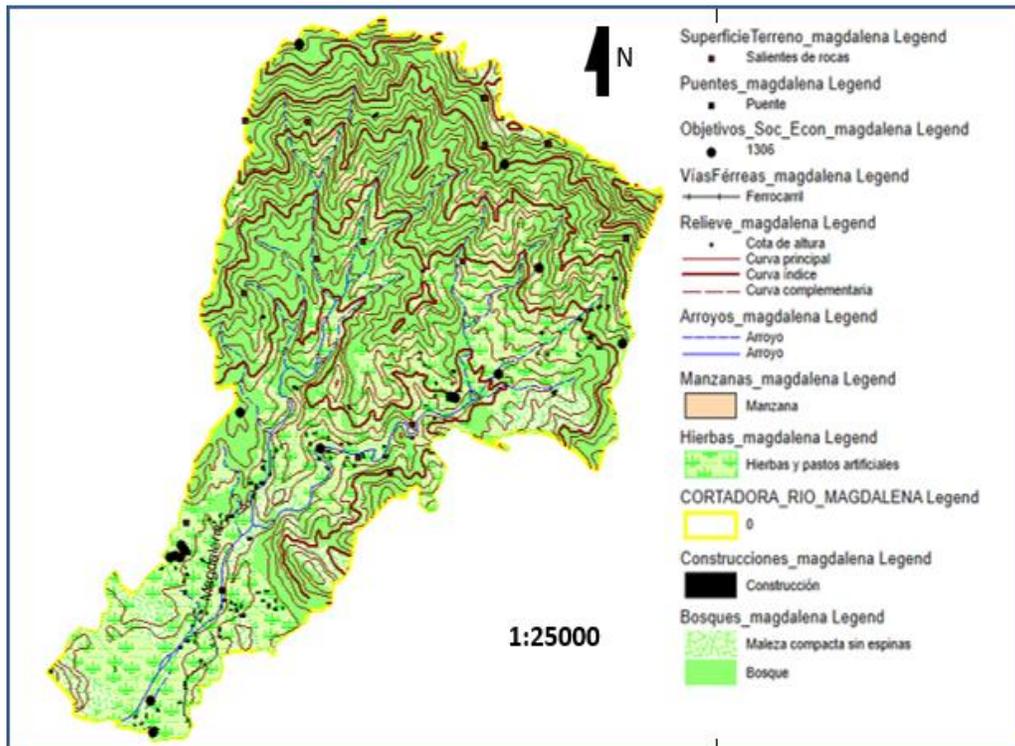


Figura 3.2 Vista de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena en Santiago de Cuba.

En esta localidad predominan los suelos ferralíticos rojo liviado, ferra lítico amarillento, feacialítico pardo rojizo, pardo grisáceo, húmico carbonático, esquelético y aluvial. Estos suelos se derivan de rocas pertiritodiolíticas, portiritas, granitoides y corteza de meteorización, ferralítica. Su potencia es variable y resulta mayor en las zonas más elevadas y estables.

El relieve de la cuenca del Río Magdalena es de tipo montañoso (Figura 3.3 Y 3.4), y el río forma un estuario en su desembocadura. Tiene una altura máxima por encima de los 1000 metros, con un relieve abrupto hacia la montaña y más suave hacia la desembocadura.

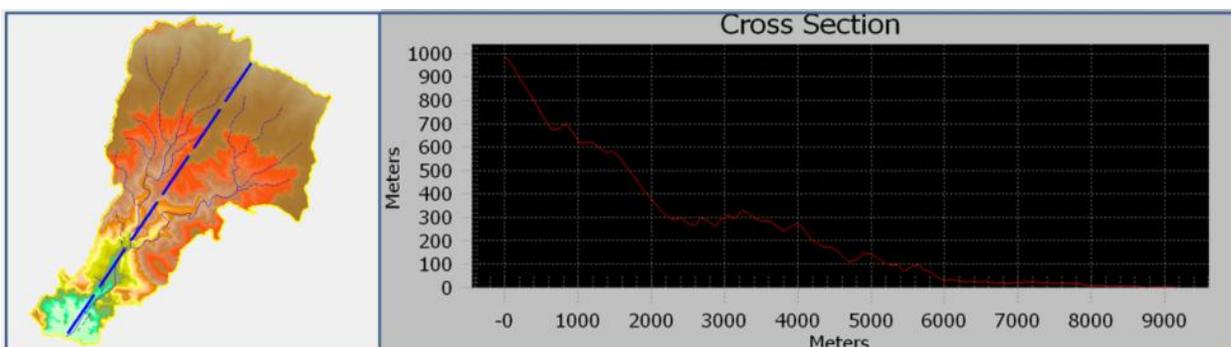


Figura3.3 Modelo Digital de elevación (MDE) mostrando la delimitación de un perfil de la cuenca hidrográfica del río Magdalena.

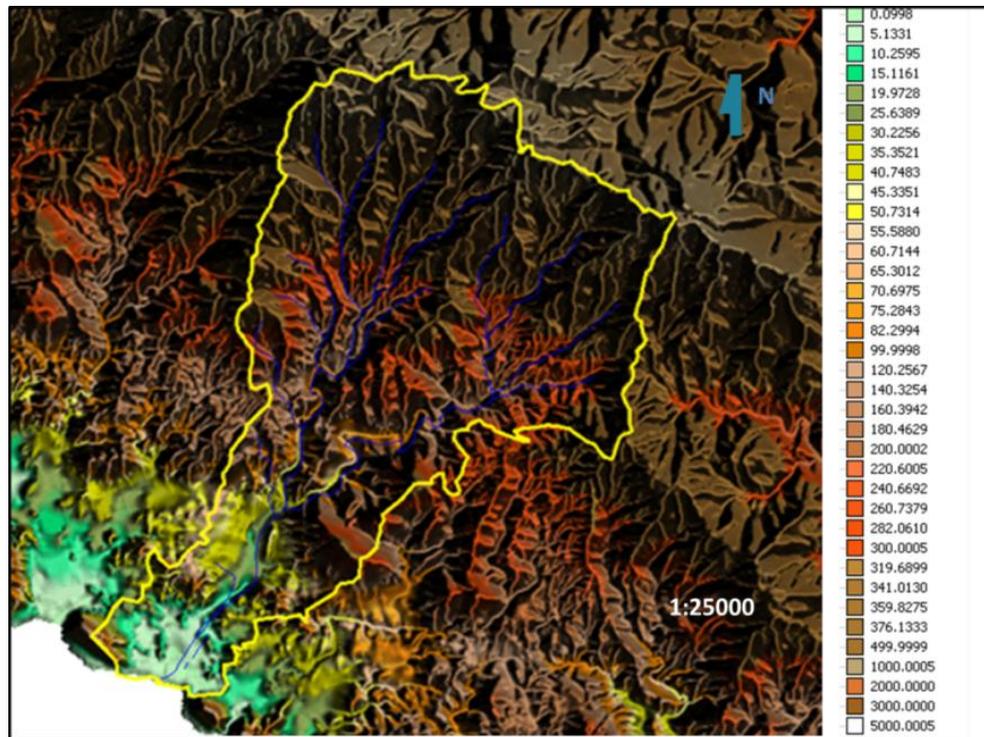


Figura 3.4 Modelo Digital de elevación (MDE) mostrando la delimitación de la cuenca hidrográfica del río Magdalena y el relieve montañoso predominante.

3.2 Selección del método para determinar el potencial hídrico superficial (escurrimiento superficial) en la cuenca hidrográfica, subcuencas y microcuencas objeto de estudio.

En el caso específico de la investigación en curso, que constituye una primera aproximación a la determinación del escurrimiento hídrico superficial con el empleo de un SIG, se escogió un método sencillo, el método racional según se expresa a continuación:

$$Q_p = 166,67 \cdot C \cdot I_p \cdot A$$

Donde:

- C: Coeficiente del escurrimiento (adimensional).
- A = Área de la cuenca (ha)
- I_p : Intensidad de las precipitaciones, para la probabilidad dada.
- Q_p : Gasto o caudal para la probabilidad dada.

Para el coeficiente de escurrimiento específicamente se emplea el expresado en la tabla 3.2 que regula los valores del coeficiente de escurrimiento (C) para cuencas no afectadas por el crecimiento urbano, según la NC 48-26 (1984a) aún vigente en Cuba y son recomendados por Fundora (1989) y González (2000).

Tabla 3.2 Valores del coeficiente de escurrimiento (C) para cuencas no afectadas por el crecimiento urbano.

Tipo de cubierta de suelo	Pendiente	Tipo de suelo		
		Grueso	Medio	Fino
		Areno-limoso	Arcilla arenosa	Arcillas compactas
Monte	0-5	0,10	0,30	0,40
	5-10	0,25	0,35	0,50
	10-30	0,30	0,50	0,60
Pastos Naturales	0-5	0,10	0,30	0,40
	5-10	0,16	0,36	0,55
	10-30	0,22	0,42	0,60
Suelos cultivados	0-5	0,30	0,50	0,60
	5-10	0,40	0,60	0,70
	10-30	0,52	0,72	0,82

A partir de esto se elaboran los mapas temáticos en el SIG de cada una de las variables de la fórmula como se expresa a continuación.

3.3 Determinación y representación espacial de los parámetros que sirven como base para los cálculos del potencial hídrico superficial.

Para el estudio en desarrollo se escogieron los cierres de 5 microcuencas, 2 subcuencas además de la cuenca en general, como se expresa en la figura 3.5

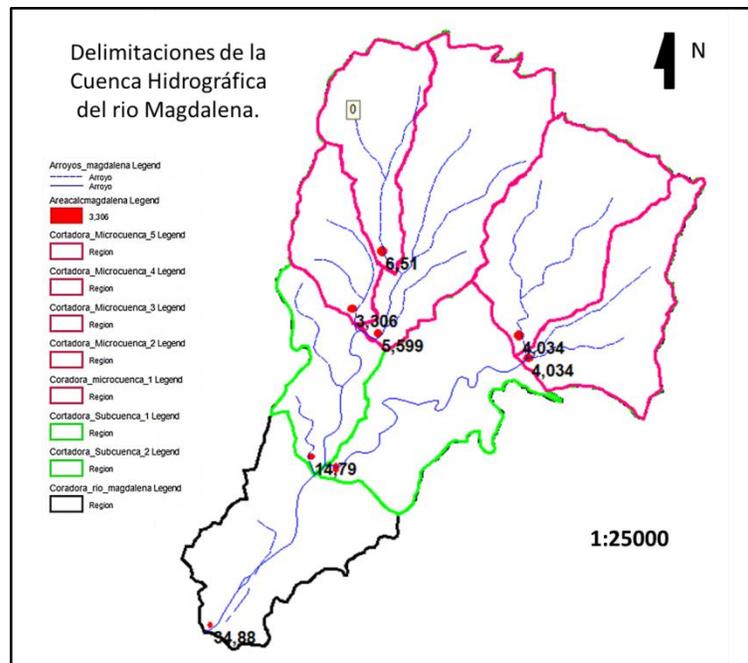


Figura 3.5 Delimitación de las Microcuenca, subcuencas y cuenca en general del río Magdalena con los puntos de cierre seleccionado.

De acuerdo a los cierres seleccionados, fueron calculados los parámetros básicos de área, perímetro y longitud de río, según se expresa en la tabla 3.5, luego fue modelada espacialmente el comportamiento del área en distintos cierres río arriba (Figura 3.6).

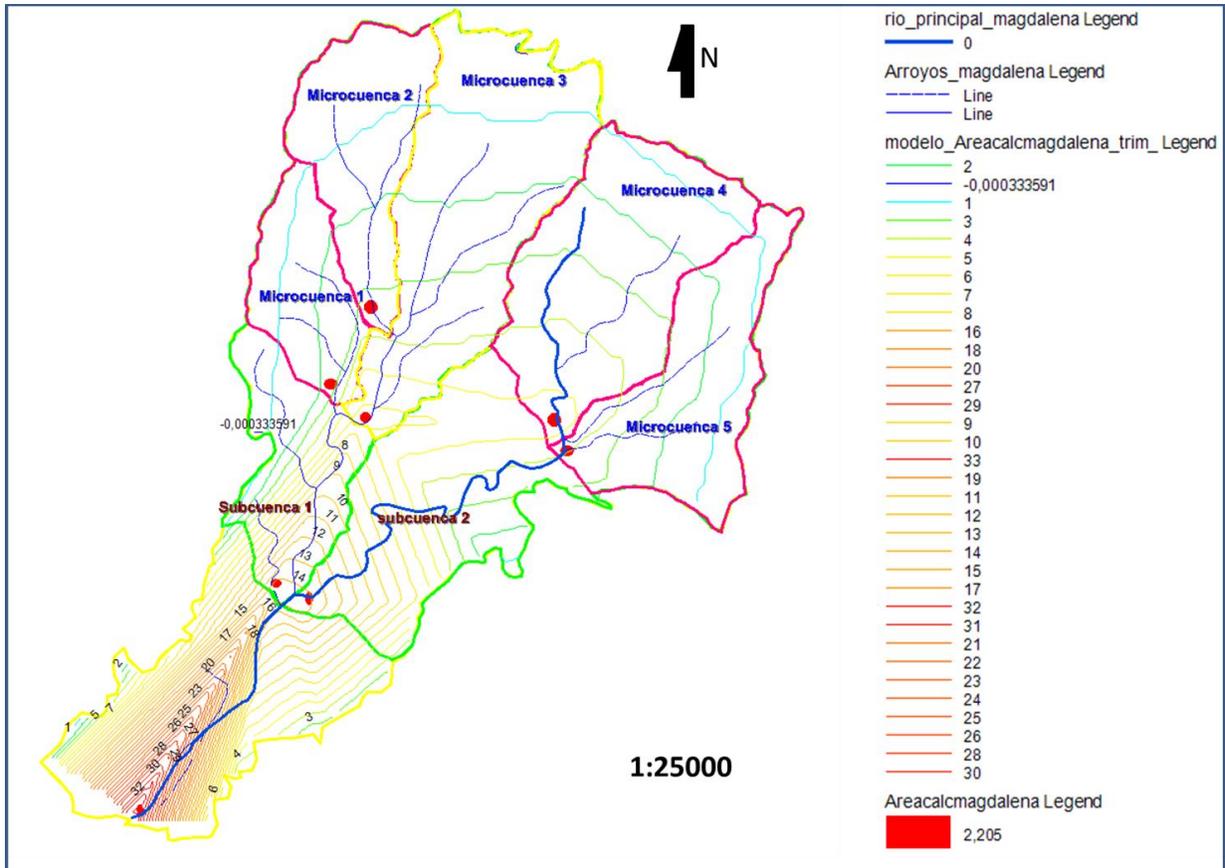


Figura 3.6 Mapa de comportamiento de isolíneas de las áreas determinadas para la cuenca del Río Magdalena.

Tabla 3.5 Parámetros de área, longitud y perímetro calculados con la ayuda de un SIG en la cuenca hidrográfica del río Magdalena.

Cuenca Magdalena	Coordenadas		Áreas(km ²)	Perímetro(km)	Longitud de Afluentes(Km)
	X(cm)	Y(cm)			
Subcuenca 1	627534,98	147470,66	14,79	20,68	6,885
Subcuenca 2	628983,57	146561,63	14,82	22,18	7,991
Microcuenca 1	626379,52	147771,85	2,205	6.896	2,085
Microcuenca 2	626985,57	148912,51	3,306	9,420	3,092
Microcuenca 3	628163,19	148401,33	6,510	15,24	3,943
Microcuenca 4	629909,90	147743,53	5,599	10,73	3,165
Microcuenca 5	630471,61	146812,30	4,034	11,04	2,327
Cuenca total	627988,25	146164,99	34,88	34,42	11,25 (rio principal)

En el área de estudio fueron identificados cercanos a las cuencas escogidas 8 estaciones pluviométricas (Figura 3.7), aunque existen otras cuyos registros fueron tenidos en cuenta para la elaboración del mapa isoyético provincial y nacional (Figuras 3.8 y 3.9), que finalmente fueron empleados en la investigación para la modelación espacial de la lluvia media anual.

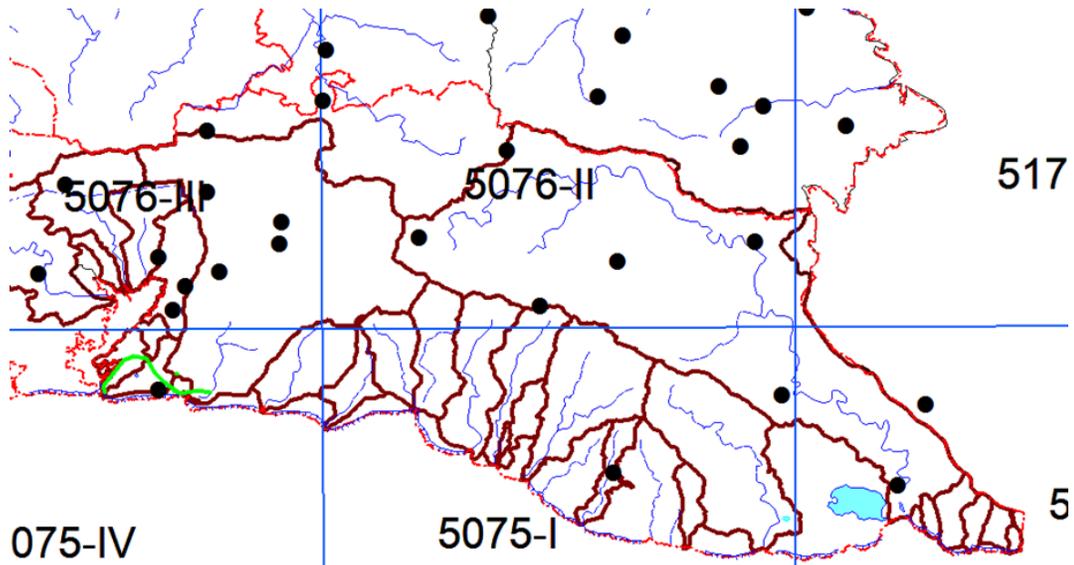


Figura 3.7 Ubicación de los Estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio.

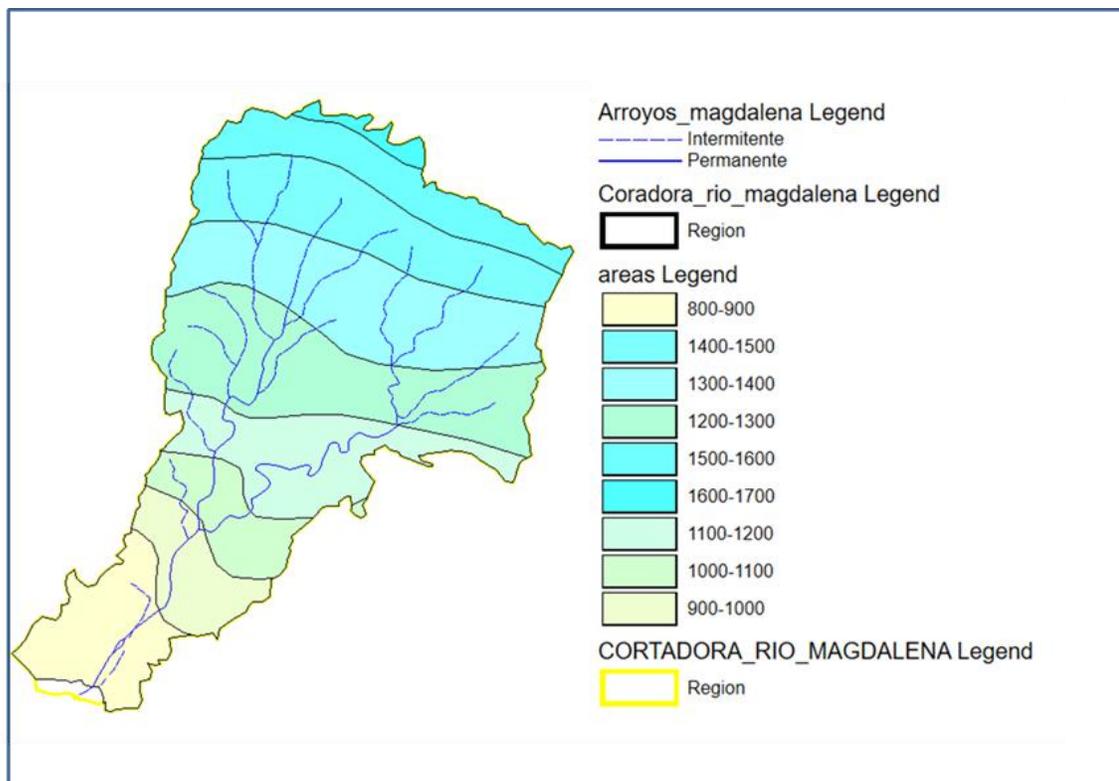


Figura 3.8 Mapa isoyético de la cuenca del Río Magdalena, obtenido del mapa nacional.

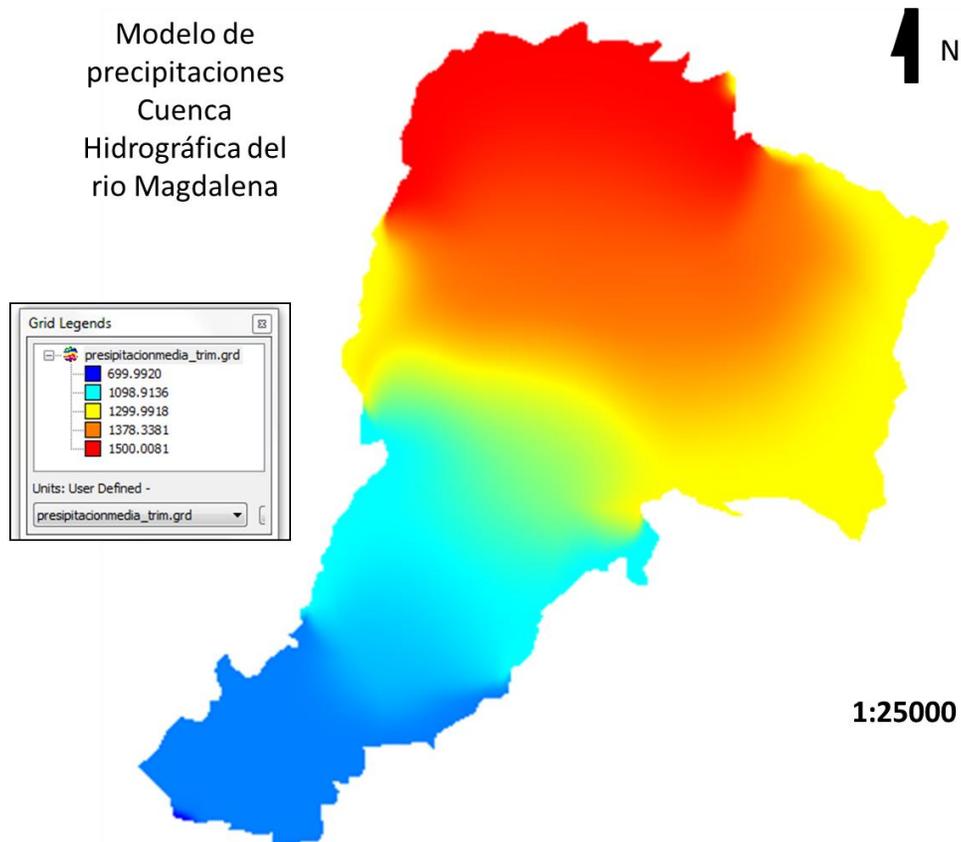


Figura 3.9 Modelo de la precipitación para la cuenca del Río Magdalena obtenido con un SIG.

Para la delimitación de las pendientes y determinación de las pendientes medias (Tabla 3.6), fue obtenido el modelo de pendientes a partir de la delimitación con el empleo del Modelo Digital de Elevación (MDE) a escala 1:10000, luego elaborado el modelo de pendientes medias para su procesamiento en el SIG en los mismos cierres escogidos anteriormente (Figura 3.10).

Tabla 3.6 Pendientes medias determinadas con la ayuda de un SIG en la cuenca hidrográfica del río Magdalena.

Cuenca Magdalena	Pendientes (Máx.)	Pendiente (Min)	Pendiente (Media)
Subcuenca 1	53,63	0,26	26,68
Subcuenca 2	54,9059	0,33	27,29
Microcuenca 1	43,07	1,39	20,84
Microcuenca 2	53,794	0,5018	26,65
Microcuenca 3	54,9067	0,0005	27,45
Microcuenca 4	54,9059	0,38	27,26
Microcuenca 5	52,3388	0,48	25,93
Cuenca total	54,906	0,0005	27,45

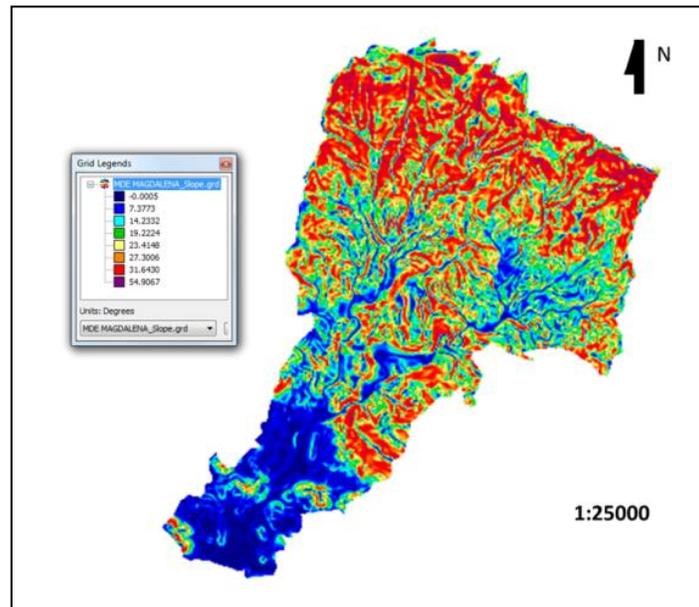


Figura 3.10 Modelo de pendientes de la cuenca del Río Magdalena, obtenido del MDE en un SIG.

Para la selección adecuada del Coeficiente de escurrimiento se tuvo en cuenta el tipo de cuenca, la que se caracteriza por ser una cuenca no urbanizada, por tanto fue empleado el criterio expuesto en la norma NC 46-1988^a vigente para Cuba, con los resultados de la tabla 3.7, en correspondencia con estos valores se obtuvo el modelo del coeficiente de escurrimiento de la figura 3.11.

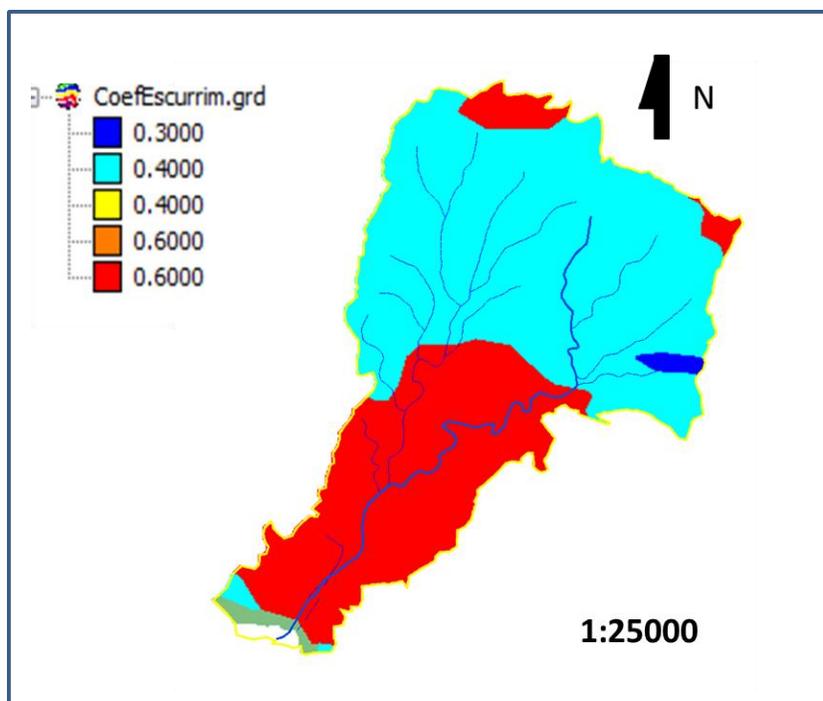


Figura 3.11 Representación espacial del coeficiente de escurrimiento con el uso de un SIG.

Tabla 3.7 Comportamiento del coeficiente de escurrimiento en la cuenca hidrográfica del río Magdalena.

Tipo de suelo presente	Coef. Escurrim
Pórfido-diorítico-cuarcifero	0,6
Calizas biodermicas masivas, carsificadas con conchas y corales escasas intercalaciones de margas.	0,5
arenas arcillosa	0,3
Andesitas	0,6
Andesitas	0,6
Rocas vulcanógenas y vulcanógeno- sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables.	0,4
Rocas vulcanógenas y vulcanógeno- sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables.	0,4
Granodioritas	0,6
Calizas biohémicas con Acropora, margas, intercalaciones de arcillas calcáreas y calcarenitas.	0,4
Calizas biohémicas con Acropora, margas, intercalaciones de arcillas calcáreas y calcarenitas.	0,4
granofido-granodioritico	0,6
dioritas-cuarciferas	0,6
Rocas vulcanógenas y vulcanógeno- sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables.	0,4

3.4 Representación espacial del potencial hídrico superficial en la cuenca hidrográfica del Río Magdalena con el uso de un SIG.

Una vez obtenidos los modelos primarios en el SIG Mapinfo y su herramienta Vertical Mapper, se realizan los cálculos del escurrimiento hídrico superficial (Figura 3.12). Luego se obtienen los modelos resultantes, se delimita y lleva a valores puntuales en todo el trayecto del río (Figuras 3.12)

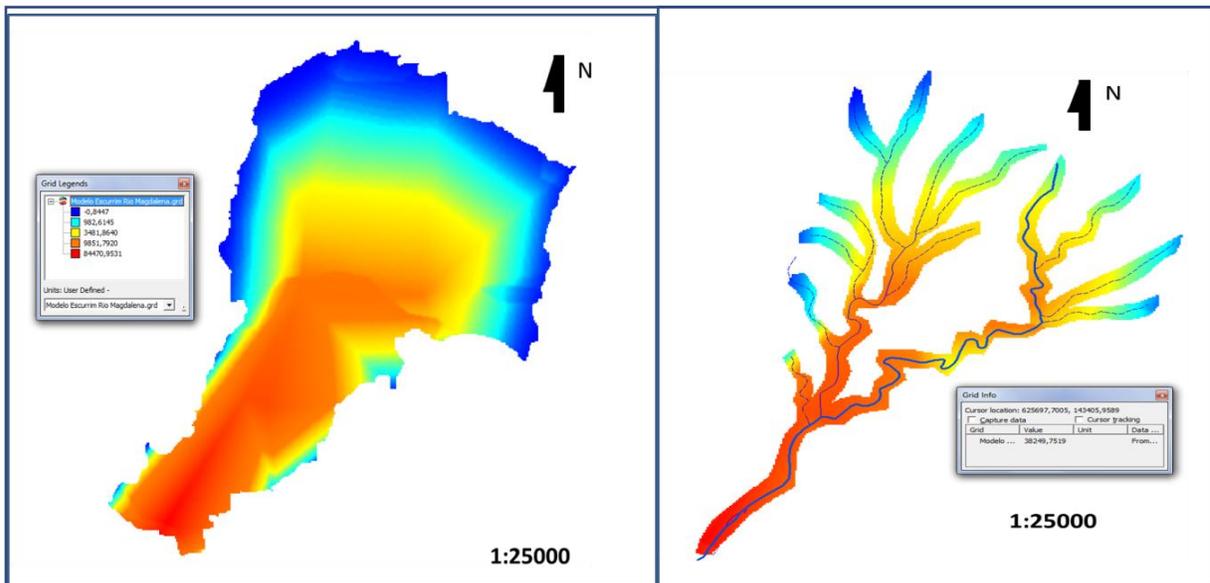


Figura 3.13 Imagen del interfaz del SIG Mapinfo y su herramienta Vertical Mapper, empleada para los cálculos del escurrimiento hídrico superficial.

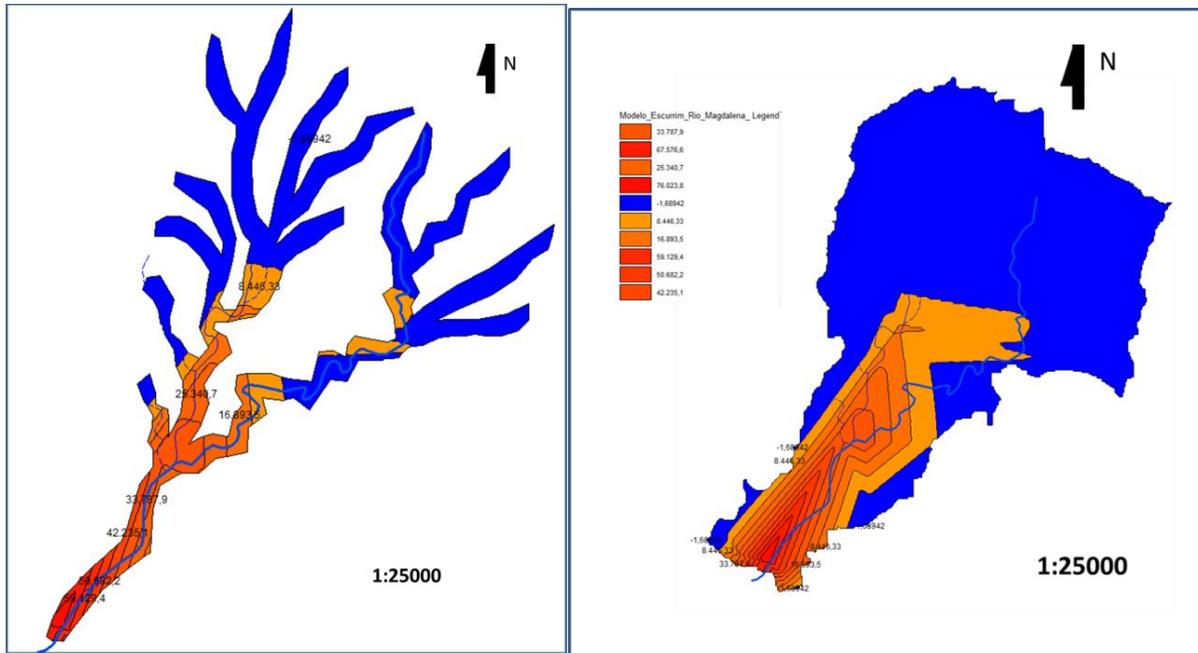


Figura 3.13 Modelo del escurrimiento hídrico superficial medio anual de la cuenca del Río Magdalena.

Teniendo en cuenta que fueron empleados valores de la lluvia media anual y el área en Km², el valor final del coeficiente de escurrimiento que se deriva es en m³/año.

Con estos resultados básicos preliminares, es posible entonces, proceder a cálculos posteriores de manera espacial y automatizada del potencial hidroenergético de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena.

Además, constituye un avance significativo para posteriores trabajos en otras cuencas de Santiago de Cuba y el país, permitiendo conocer en cualquier punto de río o arroyo un valor estimado por métodos hidrológicos de la cantidad de agua y el caudal para otros usos económicos y sociales.

Por otro lado se aclara que el trabajo realizado puede ser mejorado si se emplean escalas cartográficas más detalladas, lo que influiría en la obtención de valores más cercanos a la realidad. Por otro lado, se recomienda aplicar otros métodos hidrológicos para la determinación del potencial hídrico superficial, ya que ayudarían a establecer comparaciones y por tanto seleccionar en cada caso el más idóneo.

CONCLUSIONES

1. Fue realizada la fundamentación teórica, conceptual y metodológica de la representación del potencial hídrico superficial en cuencas hidrográficas; lo cual se fundamentó en las potencialidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el área en estudio solo se tenían estos valores para el cierre de la cuenca en su zona costera, lo que limitaba otras valoraciones tecnológicas río arriba, para su explotación o aprovechamiento.
2. Fue elaborado un procedimiento metodológico que permite garantizar los pasos a seguir durante los trabajos y la base cognoscitiva y el instrumento para la modelación del potencial hídrico superficial detallado en cuencas hidrográficas empleando software profesionales como los SIG, métodos hidrológicos y técnicas estadísticas (varias de ellas insertadas en los SIG).
3. Los resultados obtenidos en una primera instancia, demuestran que es factible la aplicación de este procedimiento para conocer de forma preliminar con qué caudal medio se cuenta en cualquier punto de un río principal o afluente de la cuenca hidrográfica seleccionada (Magdalena), de forma espacial con el empleo de un SIG; lo cual puede ser más preciso si se aplican otros métodos y escalas cartográficas más detalladas.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda aplicar otros métodos de cálculo de escurrimiento superficial, de manera que finalmente en trabajos futuros, pueda obtenerse una mayor precisión en la modelación del potencial hídrico superficial con fines hidroenergéticos.
2. Entregar los resultados de la presente investigación a la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de Santiago de Cuba para su posterior aplicación a otras cuencas hidrográficas, especialmente a Hidroenergía y Aprovechamiento hidráulico.
3. Entregar estos resultados para su implementación en la asignatura Hidrología aplicada, del nuevo Plan de estudio E de la carrera de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Oriente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pérez, Alien, 2017. “La hidroenergía se desarrolla en Cuba”. Declaración del subdirector del Centro Integrado del Tecnologías del Agua (CITA), del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Excelencias news, Cuba. <https://www.excelenciascuba.com/noticias/La hidroenergía se desarrolla en Cuba>.
2. Rosales Núñez, Andrisley. 2016. “Fuentes renovables de energía: Situación Energética Actual.”. Presentación realizada del nuevo Programa de desarrollo hidroenergético de Cuba. Empresa de Hidroenergía. Holguín. Cuba.
3. Andreianov V. 1959. Variaciones cíclicas del escurrimiento anual y su consideración en los cálculos hidrológicos. Trudí GGI, No. 68. Moscú.
4. Aparicio, M. F, (2007). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México. pp 303.
5. Araujo B. (1981) Clasificación de tierras para el uso agrícola. Cuenca del río Mocotíes. Sector medio-inferior. Tesis de Grado. U.L.A. Escuela de Geografía.
6. Benavides J. C. Procesos denudativos. Geosistemas. ID 026671. <https://lepicolea.files.wordpress.com/2018/03/11-ambientes-fluviales.pdf> (Consultado en Abril 2018).
7. Bonne Hernández, Raúl. Consideraciones Básicas para el Manejo Integrado de la Contaminación de las Aguas Costeras de la Cuenca del río Sevilla. Santiago de Cuba, Diciembre 2003.
8. CAMPOS A., D. F. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico (Tomo I y II). Editorial Universitaria Félix Varela, Ciudad de la Habana.
9. Campos, D. F., (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S. L. P., México.
10. Castro Ruz, Fidel (1992). “Discurso pronunciado en la Cumbre Mundial de Medioambiente”, Río de Janeiro. Brasil.
11. Cenhica (2001): Regionalización hidrológica y balance hídrico para las condiciones de Cuba, (inédito), La Habana, Cuba.
12. Corona A. (2005). Análisis territorial de la cuenca alta del río Mocotíes con fines de ordenación. Tesis de Grado. U.L.A. Escuela de Geografía.

13. Díaz L. R., Díaz L. J., Hernández E. 1980. Influencia de la orografía sobre la distribución de las precipitaciones. Voluntad Hidráulica. Ciudad de La Habana.
14. Durand, M, T. Evaluación del Potencial Hídrico de la Provincia Santiago de Cuba. ISBN 978-959-247-156-6. Marzo 2017.
15. García Fernández, Jorge Mario; Gutiérrez Díaz, Joaquín B. (2015). La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Consejo Nacional de Cuencas hidrográficas. La Habana, Cuba.
16. González Piedra, Julio Iván (2004). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Capítulo 1: “El manejo de cuencas en Cuba: Actualidad y Retos”. pp 21-40. Helena Cotler (compiladora). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Primera edición: diciembre de 2004. México. ISBN: 968-817-700-8. <http://centro.paot.mx/documentos/ine/452.pdf#page=22>
17. González Piedra, Julio Iván. (2003). “El manejo de cuencas en Cuba”. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/528/cuba.pdf> (Consultado en febrero, 2018).
18. GONZÁLEZ S., L. (2007). Eventos Hidrológicos Extremos. En: González Spíndola, L. et al. Hidrología Superficial para ingenieros. CIH, ISPJAE, Ciudad de la Habana. Pp. 1-145.
19. Hierrezuelo Pérez, Rolando. Metodología para la determinación del escurrimiento medio anual de una cuenca. Santiago de Cuba, junio 2016.
20. Méndez J. (2004). Uso de la tierra y calidad de vida de la población en comunidades rurales de la cuenca del río Mocotíes. Estado Mérida. Tesis de Maestría. Instituto de Conservación de los Recursos Naturales. ULA.
21. Montero González, Yuri. Estudio de la Erosión de Playas bajo el enfoque de Manejo Integrado de Zonas Costeras. El caso de Playa Sevilla. Santiago de Cuba, 2014.
22. Naranjo M. (2002). Valoración económica del agua en cuencas altas aplicando el método Delphi. Estudio de caso: Cuenca alta del río Chama. Estado Mérida-Venezuela. Tesis de Maestría. CIDIAT
23. Nouel E (1998). Estimación del balance hídrico para la micro cuenca Zarzales-La Grande. Tesis de Grado. U.L.A. Escuela de Geografía.

24. Oliveras, Jordi. (2014). "TOP10 de las mayores cuencas hidrográficas". Agua en la RED, Hidrología. <http://www.hidrojing.com/top10-de-las-mayores-cuencas-hidrograficas> . Consultado en febrero 2018.
25. Piedra, J. I. G. (2007). Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de Manejo, (inédito). C. Habana, Cuba.
26. Planas-Fajardo (2013). "Empleo de indicadores para la planificación y gestión ambiental en la cuenca del río Sevilla del municipio Guamá, Santiago de Cuba". Ciencia en su PC, No4, octubre-diciembre, 2013, p.75-87.
27. Planos, 2001. El potencial hídrico del territorio cubano.
28. Ramírez D. (2006). Bases para la implementación de un catastro en el municipio Tovar. Estado Mérida. Caso de estudio: Sector 003, Sabaneta. Tesis de Grado. Escuela de Geografía.
29. Rodríguez, F. F. Mapa Isoyético de las precipitaciones medias de la República de Cuba, (1961-2000). Voluntad Hidráulica ISSN 0505-9461 No 98 (2006).
30. Silva G. (1999). Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama. Estado Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana N° 40, volumen 1.
31. Tecnología de Tierras y Aguas I - Esgurrimiento Superficial.
32. Evert, Klaus-Jürgen (21 de mayo de 2010). [*Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning: Multilingual Reference Book in English, Spanish, French and German.*](#) SpringerScience& Business Media. [ISBN 9783540764557](#). Consultado el 15 de febrero de 2018.