



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



Estudio de variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos- Gascón y Yarayó

Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico

Autor:

Alfredo A. Antón González

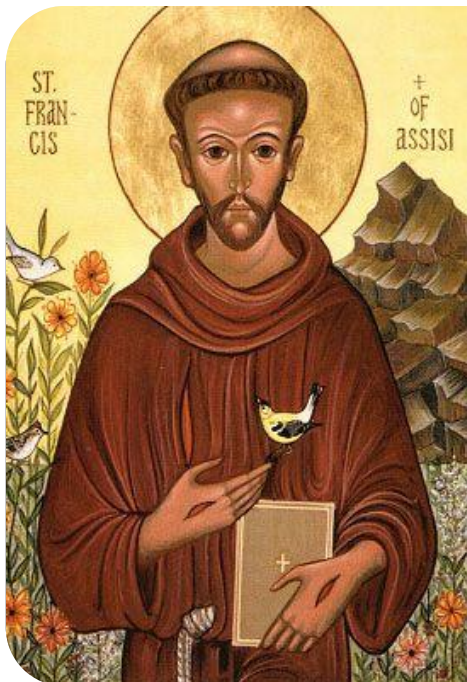
Tutores:

Dra.C. Mayelín González Trujillo

Dr.C. Alexis. Pérez Figueredo

Santiago de Cuba, Junio, 2019

Pensamiento



**Luchemos por alcanzar
la serenidad de aceptar
las cosas inevitables,
el valor de cambiar las
cosas que podemos y
la sabiduría para poder
distinguir unas de otras.**

San Francisco de Asís



San Francisco de Asís

distinguir unas de otras.

Dedicatoria

DEDICATORIA

✚ Dedico este trabajo de tesis primeramente a Dios por darme el regalo de la vida, por estar siempre a mi lado iluminando mi camino y fortaleciendo mi mente para alcanzar mis sueños, y tambien por haber puesto a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio.

✚ A mi madre Gloria González Serrano por el apoyo incondicional en todos estos años de estudio, por todo el sacrificio que ha hecho para que pudiera convertirme en un profesional y por ser para mí un ejemplo de esfuerzo y valentía.

✚ A mis abuelas Marlene, Magalis y especialmente a mi abuela Angelina por estar siempre presente en mi vida apoyandome en todo. A toda mi familia en general, a mi padrino Roberto Enrique y mi madrina Harumy Tejeda, a mis tías y primas principalmente a Yurislaidis por ser un apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

✚ A mis amigos y compañeros de aula: Yunerkis, Susana, Rosalia, Sulay, Aldo, Helen, Raider, Nadieska, Yania, Leyanis, Daniel, Niurka, Lineldris, Roxana, May, Alesyani, Laritza todos por los consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Agradecimiento

AGRADECIMIENTO

- ✓ *Agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi existencia, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.*
- ✓ *A mis padres por darme la vida, especialmente a mi mamá Gloria González Serrano por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades interpuestas en nuestro camino.*
- ✓ *A mi abuela Angelina Serrano Castillo por ayudarme siempre, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios inculcados.*
- ✓ *A todos mis familiares: tías, primos, madrina, que de una forma u otra han estado presentes apoyándome incondicionalmente, durante todo este proceso, especialmente a mi prima Yurislaidis Hodelín y a mi padrino Roberto Enrique por estar conmigo en todo momento ofreciéndome lo mejor para mi persona.*
- ✓ *A mis tutores Dra. C. Mayelín González Trujillo, Dr. C. Alexis Pérez Fiqueredo por guiarme y conducirme a buen término, por la paciencia y el esfuerzo brindado que me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.*
- ✓ *A los profesores y trabajadores del departamento de Ingeniería Hidráulica y de la FCO, especialmente a Liuneldris García(Nena), a Diamela Guilarte y a todos los que influyeron con sus consejos y preocupaciones hacia mi persona.*
- ✓ *A mis amigos y compañeros de aula: Yunerkis, Susana, Rosalia, Sulay, Aldo, Helen, Raider, Nadieska, Yania, Leyanis, Daniel, Niurka, Roxana, May, Alesyanis, Laritza por estos años de complicidad, esfuerzo, dedicación y apoyo mutuo.*

Resumen

RESUMEN

El actual cambio climático está caracterizado principalmente por un aumento de la variabilidad hidroclimática en las cuencas hidrográficas. En este contexto la siguiente investigación presenta un estudio sobre las variables hidroclimáticas en las cuencas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó; cuencas que tributan sus aguas a la bahía de Santiago de Cuba. Esta investigación tiene como objetivo determinar el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas (precipitación, temperatura, escurrimiento superficial y humedad relativa) en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó, utilizando como métodos: histórico-lógico, inducción-deducción y análisis-síntesis, así como herramientas de cálculo estadístico y el Sistema de Información Geográfica MapInfo, para la representación de modelos espaciales.

Dentro de los resultados fundamentales se destacan la caracterización de las cuencas hidrográficas y de las variables en estudio, así como la representación espacial de las precipitaciones, el coeficiente de escurrimiento y caudal, para valores reales medidos en la zona, donde estos oscilan entre (989 - 1100) mm, (0,99 - 17,99) Hm³ y (0,0316 - 0,65) m³/s respectivamente. La modelación y caracterización de estas variables hidroclimáticas permite controlar y ajustar los cambios reales y eventuales en las cuencas hidrográficas evaluadas.

Abstract

ABSTRACT

The current climate change is mainly characterized by an increase in hydroclimatic variability in watersheds. In this context, the following research presents a study on hydroclimatic variables in the basins of the Guaos-Gascón and Yarayó rivers; basins that pay their waters to the bay of Santiago de Cuba. The objective of this research is to determine the spatial behavior of the hydroclimatic variables (precipitation, temperature, surface runoff and relative humidity) in the hydrographic basins of the Guaos-Gascón and Yarayó rivers, using as methods: historical-logical, induction-deduction and analysis -synthesis, as well as statistical calculation tools and the MapInfo Geographic Information System, for the representation of spatial models. The main results include the characterization of the watersheds and the variables under study, as well as the spatial representation of precipitation, the runoff and flow coefficient, for real values measured in the area, where they oscillate between (989 - 1100) mm, (0.99 - 17.99) Hm³ and (0.0316 - 0.65) m³ / s respectively. The modeling and characterization of these hydroclimatic variables allows to control and adjust, the real and eventual changes in the watersheds evaluated.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	7
1.1. Las cuencas hidrográficas y su concepto.....	7
1.1.1 Principales cuencas hidrográficas y sus características	10
1.2. El diagnóstico de una cuenca hidrográfica.....	11
1.2.1. En el ámbito nacional	12
1.3. Estudios y métodos utilizados para la modelación de variables hidroclimáticas en cuencas hidrográficas.....	13
1.3.1. Variables hidroclimáticas más estudiadas en cuencas hidrográficas	21
1.3.1.2. Esgurrimiento superficial	25
1.3.1.3. Temperatura	28
1.3.1.4. Humedad Relativa.....	29
1.4. Concepto de variabilidad hidroclimática	29
1.5. Ejemplo de equipos para medir las variables hidroclimáticas	30
1.6. Software para la realización de los modelos espaciales	31
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	32
2.1. Metodología de trabajo	32
2.2. Características físico-geográfica general del área de estudio.....	36
2.2.1. Características de las cuencas hidrográficas Guaos-Gascón y Yarayó....	36
2.2.1.1. Cuenca de los ríosGuaos-Gascón.....	36
2.3. Descripción de las variables hidroclimática.....	44
CAPÍTULO 3. MODELACIÓN ESPACIALDE LAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICASY ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	53
3.1. Modelación de elementos básicos para el cálculo del escurrimiento superficial en las cuencas hidrográficas Guaos-Gascón y Yarayó.....	53
3.2. Modelos hidroclimáticos.....	57
3.3. Selección del método para determinar el potencial escurrimiento superficial .	60

CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	70

Introducción

INTRODUCCIÓN

Los cambios en el clima se asociaban hasta hace unos años, solamente a comportamientos y factores naturales. Sin embargo, hoy está claro que debido a los patrones de desarrollo, principalmente industriales, el hombre puede cambiar el clima terrestre, produciendo un reforzamiento del efecto invernadero (Paz, 2008).

Lo que ha traído que en las últimas décadas el planeta ha experimentado un incremento exponencial del llamado efecto invernadero, repercutiendo en las pérdidas de vidas humanas por desastres naturales (Neil *et al.*, 2003), persistiendo el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos, más aún si se puede atribuir al cambio climático; el incremento en la ocurrencia de huracanes, frentes fríos, inundaciones, sequías y otros fenómenos meteorológicos (Franco, 2012).

Las observaciones científicas dan prueba del efecto del Cambio Climático, observándose en el aumento de la temperatura del aire y del océano, de la fusión generalizada de los hielos y las nieves y del incremento del promedio mundial del nivel del mar, de acuerdo al informe de síntesis del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) de la Organización de Naciones Unidas(ONU) (Koutsoyiannis, 2003),lo que a mediano plazo produce cambios en los patrones hidroclimáticos en las cuencas, zonas marinas y costeras, afectando directamente la biodiversidad de ecosistemas altamente sensibles como los manglares, marinos, arrecifes, aguas subterráneas y acuíferos, traducándose en potenciales desequilibrios económicos y en una disminución de los recursos naturales como el agua potable para el consumo humano (UNESCO Water, 2006).

En las cuencas exorreicas, la cantidad de agua dulce y potable disponible es limitada; pues el agua de mar que se filtra hacia el interior de los ríos, lagunas costeras y hacia el subsuelo por los poros y grietas de las rocas, provoca la salinización de los mantos acuíferos, disminuyendo su potabilidad y esto aumentado exponencialmente por el cambio climático. En las regiones costeras, el agua dulce del subsuelo forma un depósito que se localiza a poca profundidad, mientras más

cerca de la playa o del mar se perfora un pozo, más probabilidad habrá para que el agua del manto acuífero sea salina y poco potable (Kleypas *et al.*, 2006).

El agua por ser un recurso indispensable para el normal desenvolvimiento de todas las actividades humanas tiene una gran importancia económica, por lo que las estimaciones de algunas variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas productoras de agua; pueden en cierta medida ser determinantes en su desarrollo socioeconómico, dado que los resultados obtenidos por lo general permiten asumir acciones preventivas en aquellos casos en que se presente un uso indiscriminado del recurso o que se vea afectado por las causas del cambio climático y pueden resultar valiosos en su planificación y conservación, llevando de este modo a un buen manejo del agua y por lo tanto a un armónico desarrollo de las actividades que se desarrollen (Prieto, 2004).

En las fases de planeación y manejo de los recursos hídricos se considera que los procesos hidrológicos son invariantes en el tiempo y donde el pasado se asume como representativo del futuro. Tal consideración de estacionalidad puede ser no válida debido a la variabilidad natural y los cambios antropogénicos inducidos en el sistema climático (Milly *et al.*, 2008).

No obstante cuando se pretende llevar a cabo estimaciones de las variables hidroclimáticas en aquellas cuencas hidrográficas con potencial para la producción de agua para abastecimiento agrícola y doméstico, los diferentes especialistas se encuentran con diversos inconvenientes de entre los cuales se podrían mencionar los siguientes: escasez o ausencia de estaciones climáticas y poca o ninguna información asociada al uso del agua, entre otros. Es por ello que por lo general se acuden a técnicas estadísticas y cartográficas a fin de solventar la falta de información confiable y así generar datos preliminares importantes para la administración hídrica (Sharp, 2004).

Los estudios en áreas con escasez de estaciones climáticas e hidrométricas ha sido constante preocupación para los diferentes especialistas en la rama hidroclimática, y más aún en aquellos lugares en que las características climáticas e hídricas condicionan el desarrollo de las actividades económicas; es por ello que los estudios sobre la distribución en el tiempo y en el espacio de algunas variables hidroclimáticas

podrían ser útiles en la planificación económica, y cuando estos estudios son complementados con estimaciones de demanda de agua cobran más importancia sobre todo en la administración hídrica (Prieto, 2004).

Informaciones procedentes de (Paz *et al.*, 2008) indican que la Convención de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente, desarrollada en Río de Janeiro, reconoció que los pequeños estados insulares en desarrollo (en los que se incluye Cuba) constituyen un caso especial para el equilibrio del medio ambiente y para el desarrollo sostenible. Las pequeñas islas tienen características que las hacen especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático, al incremento del nivel del mar y a los eventos extremos.

El Instituto de Meteorología de Cuba ha planteado que el clima de la Isla se ha caracterizado, durante la segunda mitad del siglo XX, por el incremento de la temperatura superficial del aire, la mayor frecuencia de eventos de sequías severas, el aumento de la proporción de totales de lluvia en invierno, asociadas a eventos de grandes precipitaciones. Se adiciona el aumento de la capacidad destructiva de las líneas de tormentas prefrontales y tormentas locales severas.

La vulnerabilidad de los ecosistemas costeros en Cuba es un factor a tener en cuenta, junto a otros no menos importantes como son: el reducido espacio físico terrestre y la alta proporción de espacios marinos circundantes, los recursos limitados que no permiten mucho margen de error en su uso, la alta sensibilidad a recibir fenómenos naturales extremos en su entorno, la poca variabilidad climática, la influencia de los sucesos terrestres y los peligros asociados al tratamientos de residuales y vertimientos de desechos (Legrá, 2011).

Específicamente Cuba, por su posición y características geográficas (un país insular y tropical) resulta vulnerable a las consecuencias de esas transformaciones medioambientales. Estudios realizados por científicos cubanos han confirmado impactos perceptibles en la Isla, entre los que destacan: el ascenso lento y constante del nivel del mar, la disminución del volumen de agua disponible y del régimen de lluvias, y una extensión en la aridez de los suelos hacia la zona oriental.

Según informó la agencia de noticias EFE en mayo de 2018. Ante estas y otras realidades medioambientales en la Mayor de las Antillas, el 25 de abril de 2017, el

Consejo de Ministros aprobó la “Tarea Vida”: el Plan del Estado cubano para la reducción de los efectos del cambio climático y el cuidado medioambiental.

Tarea Vida. Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático sustentado sobre una base científica multidisciplinaria, que da prioridad a 73 de los 168 municipios cubanos, 63 de ellos en zonas costeras y otros 10 en el interior del territorio. Contempla cinco acciones estratégicas y once tareas dirigidas a contrarrestar las afectaciones en las zonas vulnerables, las mismas fueron aprobadas el 25 de abril de 2017 por el Consejo de Ministros y constituyen una prioridad para la política ambientalista del país. El Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente es el encargado de implementar y controlar las tareas del Plan de Estado.

Dentro de las tareas principales de este plan multifactorial se encuentra la **Tarea #5**; que tiene como objetivo dirigir la reforestación hacia la máxima protección de los suelos y las aguas en cantidad y calidad; así como a la recuperación de los manglares más afectados. Priorizar los embalses, canales y franjas hidrorreguladoras de las cuencas tributarias de las principales bahías y de las costas de la plataforma insular.

En este orden de ideas, se tiene que la información hidroclimática disponible en las cuencas que tributan a la bahía de Santiago de Cuba es insuficiente para analizar a grandes rasgos la distribución de algunas variables como: precipitación, temperatura, escurrimiento superficial, humedad relativa, pues se requieren de registros con frecuencia mensual en diferentes puntos de las cuencas; es por esta razón que se debe acudir a métodos indirectos que de alguna manera solventen la carencia de información confiable y actualizada.

Situada en la costa meridional de Cuba, frente al mar Caribe, a 110 millas al oeste de Punta de Maisí, en la costa suroriental, perteneciente a la provincia de Santiago de Cuba está la Bahía santiaguera.

Considerada entre las típicas bahías de bolsa o cuello de botella. La superficie total de la bahía es de 11.9 km²; con un perímetro del litoral incluyendo sus cayos de 41,35 Kilómetros. Tiene un largo máximo de 8,5 Km, la parte más ancha de la bahía es la zona central desde la molinera Frank País hasta Punta Sal al Norte de la refinería de

petróleo Hermanos Díaz la cual tiene 2 Km, mientras que la parte más estrecha está en el canal de entrada con 225 metros de ancho, y una profundidad entre 8,8 y 13,7 m. Su fondo es de piedras y arena (CITMA, 2016).

En la bahía santiaguera descargan sus aguas los ríos El Cobre, Guaos-Gascón, Yarayó, así como el dren Yarto o Trocha. El hecho de que la cuenca este encajonada en una gigantesca depresión hace que la temperatura sea muy elevada al no recibir directamente la influencia de los vientos alisios, ni las brisas marinas, por esta razón Santiago de Cuba es la región de más alta temperatura media anual (CITMA, 2016). Se observa que se necesita una cantidad de datos para analizar, para esto hay que conseguir unir estas variables para llevar acabo el análisis de la información. Aquí es donde entran los Sistemas de Información Geográfica (SIG) o GIS, por sus siglas en inglés.

Se entiende por “Sistemas de Información Geográfica (SIG)” la conjunción de datos relacionados con el espacio físico con herramientas informáticas, con programas informáticos o software que permiten a los usuarios finales crear consultas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio. La información geográfica va a ser aquella información que tiene algún componente espacial, es decir, una ubicación, y además, una información atributiva que detalle más sobre ese elemento en cuestión.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones (Chang, 2007).

En la revisión documental y bibliográfica realizada no se encontraron suficientes evidencias de trabajos que incluyan este tema y específicamente del área de estudio, solo constan reportes de variables hidrometeorológicas controladas por las estaciones meteorológicas pero no su interpretación espacial en relación a la variabilidad hidroclimática.

Por lo antepuesto se asume como **problema de investigación:**

Insuficientes estudios sobre el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó; tributarias a la bahía de Santiago de Cuba, ante el efecto del cambio climático y sus consecuencias.

Objeto de investigación: Las variables hidroclimáticas en cuencas hidrográficas.

Objetivo general: Determinar el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas (precipitación, temperatura, escurrimiento superficial, humedad relativa) en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó, tributarias a la bahía de Santiago de Cuba.

Campo de acción: El comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó.

Objetivos específicos:

- Sistematizar el marco teórico metodológico de la investigación.
- Caracterizar las variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó tributarias a la bahía de Santiago de Cuba.
- Realizar la modelación espacial por variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó, a través de un SIG.

Hipótesis:

Si se determina el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó, se contribuye a brindar elementos científicos para la toma de decisiones ante el efecto del cambio climático.

Capítulo 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En este capítulo se analiza los aspectos fundamentales del marco teórico-conceptual, se hace una revisión bibliográfica referente a las cuestiones del objeto de estudio, se describen las referencias y antecedentes de este tópico, las principales concepciones y definiciones en torno a las cuencas hidrográficas, los procesos y las variables hidroclimáticas que intervienen en estas, y además se muestran los métodos y Softwares utilizados para el estudio modelación de las mismas.

1.1. Las cuencas hidrográficas y su concepto

La definición de cuenca hidrológica desarrolla un enfoque más integral que la de una cuenca hidrográfica. Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales y además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo (Hawkins *et al.*, 2009). El concepto antes expuesto deja claro el objeto de estudio, además que permite evaluar, comparar y objetivar las tareas a ejecutar.

De acuerdo con Llerena, (2003), el concepto de cuenca como unidad territorial natural es el más importante ya que a partir de esta apreciación se puede comprender que únicamente en la cuenca hidrográfica es posible realizar balances hídricos. Es decir, cuantificar la oferta de agua que “produce” la cuenca durante el ciclo hidrológico. Es por sus cualidades de unidad hidrológica y de medio colector-almacenador-integrador de los procesos naturales y antrópicos que ocurren en la cuenca, que esta puede ser también una unidad política-administrativa, de gestión ambiental o de manejo de los diversos recursos naturales que alberga.

Una de las definiciones más actualizadas de cuenca hidrográfica es: “Superficie terrestre drenada por un sistema fluvial continuo y bien definido, cuyas aguas vierten a otro sistema fluvial y sus límites están generalmente determinados por la divisoria principal según relieve” (González, 2002).

Siguiendo el análisis anterior, según el glosario hidrológico internacional de la UNESCO, es *“el área de drenaje de un curso de agua, río o lago*. De acuerdo con el Diccionario de Términos Ambientales de Camacho y Airosa, (2000), se define la cuenca hidrográfica como *“un área geográfica y socioeconómica delimitada por un*

sistema acuático, donde las aguas superficiales se vierten formando uno o varios cauces y que puede desembocar en una red hidrográfica natural. La misma es un sistema socio ecológico en el cual la actividad antrópica está en estrecho vínculo con los recursos naturales en ella existentes, entre ellos, el agua, a través de sus diversos usos (consumo humano y doméstico, industrial y agrícola)”.

Otros de los conceptos abordados por el Diccionario de Términos Ambientales de Camacho y Airosa (2000) es el de una “zona de terreno en la que el agua, los sedimentos y materiales disueltos drenan hacia un punto común”. El tamaño puede variar desde la cuenca del Amazona hasta la del más pequeño arroyo en función de la escala y los objetivos del estudio.

A partir de la creación del Consejo de Cuencas Hidrográficas, éste y el nuevo estilo adoptado en el trabajo ambiental, considera a la cuenca como “la unidad básica funcional y ámbito de aplicación de los programas y planes de manejo integral de los recursos naturales, en su vínculo con el desarrollo económico y social. Concepto amplio que posibilita el análisis y aplicación de los mecanismos de gestión que fortalece la protección ambiental de estos ecosistemas, por lo que se adopta como marco de referencia para su aplicación en el presente estudio.

Según Landa, (2005) una cuenca hidrográfica refiriéndose a la definición geográfica de la misma, es el contorno o límite de la misma que drena agua en un punto en común (ver figura1.1).

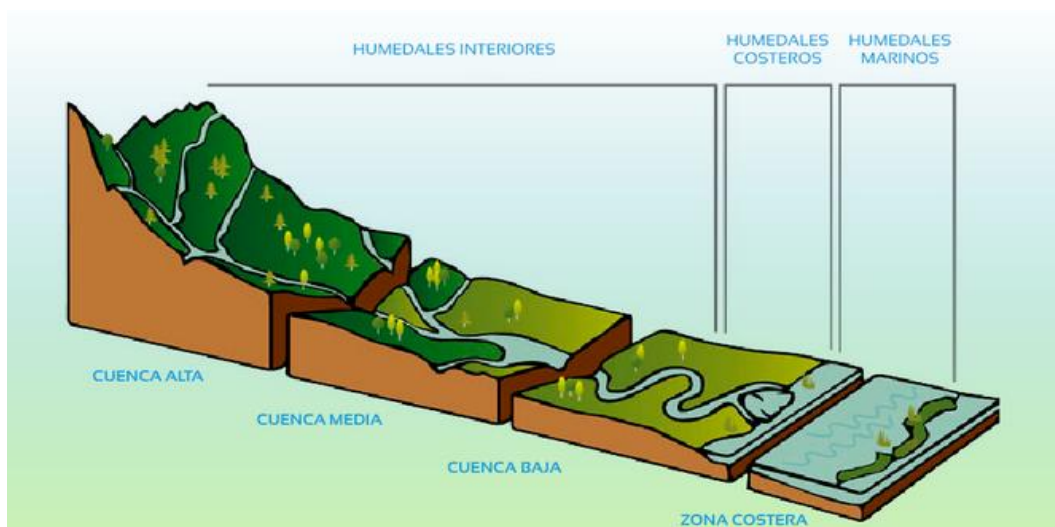


Figura1.1.Esquema de una cuenca hidrográfica Fuente: Hawkins et al., (2009).

Los autores citados anteriormente al definir el concepto de cuenca hidrográfica concuerdan considerablemente en su definición. En ese sentido, señalan que es necesario tener un conocimiento básico de estas, como unidad mínima de gestión; para poder hacer una caracterización y diagnóstico del recurso hídrico, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que sirva de base a los usuarios del recurso y planificadores, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros. Es importante entonces conocer dentro de los términos que generalmente se utilizan, definir e identificar los componentes que identifican las características de una cuenca hidrográfica.

Partes componentes de una cuenca hidrográfica:

- Cuenca: Sistema integrado por varias subcuencas o microcuencas.
- Subcuencas: Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.
- Microcuencas: Una micro cuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una Subcuenca; es decir, que una Subcuenca está dividida en varias microcuencas (ver figura2).



Figura1.2.Cuenca, subcuenca y microcuenca, Fuente: Adaptado por Casa verde, (2011).

Se puede afirmar que existe una diferencia significativa entre las cuencas según su tamaño (una cuenca pequeña y una grande). En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, sobre las cuales el hombre tiene algún control. En cambio, para grandes cuencas el efecto del almacenamiento en el cauce llega a ser

pronunciado y habrá que darle más atención a la hidrología de la corriente principal. Por esto hay que tener bien caracterizadas las partes de una cuenca hidrográfica para un mejor uso de estas y un mejor manejo de los recursos naturales de estas.

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar (figura 1.3), según su ubicación en:

- Cuenca alta: Corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas.
- Cuenca media: Donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido.
- Cuenca baja o zonas transicionales: Donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales



Figura 1.3.Cuenca Bien Manejada. Fuente: Guía de Educación Ambiental, (2010).

Un aspecto muy importante en la caracterización de la cuenca es lo relacionado a la cantidad de agua que hay en ella, como esta y a la calidad de este recurso para los diferentes usos y principalmente para consumo humano. En la cuenca hidrográfica existen entradas y salidas, por ejemplo, el ciclo hidrológico permite cuantificar que a la cuenca ingresa una cantidad de agua, por medio de la precipitación y otras formas; y luego existe una cantidad que sale de la cuenca, por medio de su río principal en las desembocaduras o por el uso que adquiera el agua.

1.1.1 Principales cuencas hidrográficas y sus características

Pueden encontrarse clasificaciones de cuencas relacionadas con el lugar donde descargan finalmente las aguas (ver figura 1.4), estas son:

Cuencas endorreicas: son aquellas que las aguas no llegan al mar, que tienen como resultado la formación de sistemas de agua estancada (como lagos o lagunas).

Cuencas exorreicas: son aquellas que drenan sus aguas al mar o al océano y que por lo tanto no quedan encerradas entre los diferentes conjuntos de montañas.

Cuencas arreicas: son aquellas en que las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje. Los arroyos, aguadas y cañadones de la meseta patagónica central pertenecen a este tipo, ya que no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico de importancia. También son frecuentes en áreas del desierto del Sahara y en muchas otras partes.



Figura 1.4.Tipos de cuencas: a) Exorreicas, b) Endorreicas y c) Arreicas. Fuente: <http://recuperapatzcuaro.com/lacuenca.php/>

Las cuencas hidrográficas tienen diferentes características estas se clasifican en: La curva cota superficie que es una indicación del potencial hidroeléctrico de la cuenca, el coeficiente de forma, el cual da indicaciones preliminares de la onda de avenida que es capaz de generar y el coeficiente de ramificación que también da indicaciones preliminares respecto al tipo de onda de avenida.

http://www.marc.org/Environment/water/Espanol/watershed_espanol.htm

1.2. El diagnóstico de una cuenca hidrográfica

En el diagnóstico de la cuenca se hace énfasis en cuatro componentes que son: la parte biofísico, lo socioeconómico, los aspectos tecnológicos y productivos y también la parte institucional y legal. Como resultado de un diagnóstico de la cuenca se debe lograr los siguientes resultados: la descripción biofísica y socioeconómica de la

cuenca, conocer el potencial de la cuenca, conocer el uso que actualmente tiene la cuenca, conocer la problemática, las necesidades, conflictos y las áreas críticas. Identificar los sitios y zonas vulnerables, con peligros o amenazas. Analizar las probabilidades de desastres naturales por el mal manejo de la cuenca. Conocer las limitantes y restricciones. Determinar las causas y efectos de problemas y conflictos. Conocer las tendencias (proyecciones) de las diferentes actividades y usos de los recursos naturales. Identificar propuestas de soluciones o alternativas para muchos problemas y necesidades considerando las opiniones de los diferentes actores de la cuenca. Estar al tanto de la vulnerabilidad de la cuenca, es muy importante para el ordenamiento del territorio de acuerdo a condiciones de peligrosidad, riesgos o amenazas. Un aspecto muy importante en la caracterización de la cuenca es lo relacionado a la cantidad de agua que hay en ella y a la calidad de este recurso para los diferentes usos y principalmente para consumo humano (Eoarth, 2012).

1.2.1. En el ámbito nacional

En Cuba en el mes de abril de 1997, el Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros (CECM) toma el Acuerdo No. 3139 donde se plantea: Crear el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas como el máximo órgano coordinador en materia de ordenamiento y manejo de las cuencas hidrográficas del territorio nacional, constituyéndose en el país el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH). Se inició un nuevo estilo de trabajo que permitió variar los conceptos del manejo integrado de cuencas, en la cual se integran todos los componentes naturales del medio ambiente, junto al desarrollo económico y social, en función de alcanzar el desarrollo sostenible (García, 2007).

Entre los criterios de manejo de los recursos naturales, se considera la cuenca hidrográfica como unidad básica funcional y ámbito de aplicación de los programas y planes de manejo integral de los recursos naturales, en su vínculo con el desarrollo económico y social. En el país existen 652 cuencas hidrográficas de dimensiones superiores a los 5 km, 85% de las cuales no rebasan los 200 km² y la longitud de la corriente superficial es inferior a 40 km (*Voluntad Hidráulica No.105, 2012*).

El territorio cubano ocupado por cuencas hidrográficas superficiales abarca 81 038 km², así como 26 312 km² corresponden a ciertas áreas sin red fluvial definida, ciénagas y otras. Ello significa que prácticamente no hay punto de la geografía nacional que esté fuera de una cuenca, ya sea superficial o subterránea. En las 652 cuencas hidrográficas existentes, fluye el 80% del escurrimiento fluvial, evaluado en cerca de 31 682 millones de metros cúbicos, de los cuales más de 7 000 millones han sido acumulados en represas desde 1959 por más de 212 grandes obras hidráulicas y 762 micropresas (*Voluntad Hidráulica No.105, 2012*).

Existen en el país diez cuencas hidrográficas a las que se les denomina “De Interés Nacional” por su complejidad económica, social y ambiental, el grado de afectación a sus recursos naturales y sus características generales, por lo que es necesaria su protección. Estas cuencas son: Cuyaguaje, Almendares-Vento, Ariguanabo, Hanabanilla, Zaza, Cauto, Guaso y Toa. Existen además 51 Cuencas de Interés Provincial en el país (Gearh, 2002).

1.3. Estudios y métodos utilizados para la modelación de variables hidroclimáticas en cuencas hidrográficas

El trabajo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (IPCC 2007) señala que la comprensión de la variabilidad hidroclimática constituye la clave para la adaptación a procesos de cambio climático global, por ello recomienda entenderla como estrategia para la reducción de riesgos. En este sentido, la formalización de este concepto y su inclusión manifiesta en pronósticos hidrológicos de largo plazo resulta prometedora.

Las complejas interacciones en el sistema agua-atmósfera-suelo pueden ser evaluadas a través de las variables hidroclimáticas como la precipitación, temperatura, escurrimiento superficial, humedad relativa (Lastra *et al.*, 2008; Macías, 2007; Giménez y Lanfranco, 2012). Por lo que la investigación de los patrones y posibles cambios en la tendencia de estas variables a escala espacio-temporal ayuda a generar medidas de planeación, mitigación y la evaluación de la resiliencia del ecosistema hacia tal variabilidad. Moron *et al.*, (1992) recomienda que para el

análisis de tendencias de series climáticas se requiere contar con al menos 30 años de registros continuos.

En la literatura internacional y nacional existen numerosos estudios y métodos que se utilizan en la modelación de variables hidroclimáticas. En la escala internacional se verificaron diferentes países que trabajan a través de investigaciones de las variables hidroclimáticas en el mejoramiento de las cuencas hidrográficas a continuación se expresan y analizan algunos de los métodos más utilizados para este tipo de análisis.

La investigación de Carmona, (2010) hace un estudio de los principales modos de variabilidad hidroclimática en series de precipitación, caudales y temperatura, estas variables son estudiadas en diferentes períodos de tiempo –espacio, definiendo su comportamiento en Colombia y en la cuenca Amazónica, de varias resoluciones estacionales, comparando los resultados obtenidos mediante las transformadas de Fourier, Onditas y Hilbert-Huang. La Transformada de Hilbert-Huang (THH; Huang *et al.*, 1998, Huang y Wu, 2008) es una herramienta matemática moderna que se compone de la Descomposición en Modos Empíricos (DME), y de la transformada de Hilbert. Esta transformada es aplicable para estimar el espectro de señales no lineales y no estacionarias, permitiendo el análisis de series de variables sin un procesamiento previo, entregando resultados de fácil interpretación física.

En la implementación de la transformada de Hilbert-Huang se ha utilizado el software DATADEMON V1.2. El software permite realizar la descomposición en modos empíricos de la serie, así como calcular la transformada de Hilbert a las funciones de modos intrínsecos (FMI) y estimar el espectro de Hilbert (Huangwu, 2008). Este estudio identificó señales de cambio climático y variabilidad hidroclimática de largo plazo a través de la metodología de la Descomposición en Modos Empíricos.

Por otra parte, Baines, (2005) afirma que las variaciones de largo plazo en la lluvia del occidente de Australia están directamente relacionadas con las variaciones en la precipitación del monzón Africano, a pesar de que las variaciones de ambas cantidades en la escala interanual están afectadas por otros factores. Molla *et al.*, (2005) estudiaron el comportamiento de la lluvia en la India a través de la descomposición en modos empíricos. Demostraron que la mayoría de las FMI tienen

una distribución Normal y que su energía sigue una distribución estadísticamente significativa. El trabajo sugiere que el calentamiento global reciente, conjuntamente con la variabilidad hidroclimática contribuye no sólo a la ocurrencia de eventos cálidos más extremos, sino también a épocas de sequía e inundaciones más frecuentes y más duraderas.

Posteriormente, Molla *et al.*, (2006), utilizan la descomposición en modos empíricos con el fin de explorar las propiedades de las series de temperatura superficial del aire en la India y observar los efectos del cambio climático bajo la perspectiva del cambio global. Esto permite tener un seguimiento de la variable y además sirve como antesala para estudios relacionados con el aumento de la temperatura en la India y en otros países.

Amores, (2005) hace una monografía en la región denominada Costa de Chiapas en México, esta ha sido afectada por algunos períodos de estiaje y por inundaciones, los cuales han causado serios daños económicos y sociales. Esta toma en cuenta la variación espacial y temporal de las variables hidroclimatológicas en la tesis. Con este propósito recolecta la información de lluvia, temperatura máxima y mínima de 51 estaciones climatológicas para el período 1960- 2010, así como los escurrimientos de 12 estaciones hidrométricas del período 1964 a 2005. El análisis de tendencia de las series de tiempo anuales (año agrícola) y estacionales (primavera-verano y otoño-invierno) de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, evapotranspiración y escurrimientos, se realizó con la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall.

Éstos resultados se tomaron en cuenta para adoptar medidas de protección contra la ocurrencia más persistente de las inundaciones pluviales y fluviales, así como las medidas de mitigación contra el incremento de las temperaturas máximas que afectan la salud de los seres vivos, y de la evapotranspiración que incrementa la demanda de agua en la agricultura. Para detectar tendencia (incremento o decremento) se ha aplicado la prueba de Mann-Kendall (Mann, 1945 y Kendall, 1975) a las series de acumulados (precipitación, evapotranspiración y escurrimiento) y promedios (temperatura máxima y mínima) en el año agrícola (octubre-septiembre), primavera-verano (abril- septiembre) y otoño-invierno (octubre-marzo).

La interpolación de los mapas fue mediante el método de distancia inversa ponderada (IDW) (Díaz *et al.*, 2008). Los resultados de la aplicación de la prueba de tendencia de Mann-Kendall a las variables de precipitación de lluvia, temperatura máxima, temperatura mínima, evapotranspiración y escurrimiento en la región denominada Costa de Chiapas indican la existencia de zonas con tendencia temporal en las series de acumulados y promedios en los períodos de año agrícola, primavera-verano y otoño-Invierno.

También en México, Mendoza, (2010) en su artículo propone obtener un modelo espacialmente distribuido de precipitación y temperatura de la cuenca del lago de Cuitzeo, a partir de métodos de interpolación que utilizan variables hidroclimáticas y geográficas apoyado en la aplicación de los análisis de correlación y regresión simple y múltiple, uso de herramientas propias de los sistemas de información geográfica.

El autor declara que en la actualidad se han desarrollado técnicas que permiten la aplicación de métodos estadísticos de regresión simple y múltiple combinados con los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de obtener información climática continua en áreas donde no existen datos de estaciones meteorológicas (Hartkamp *et al.*, 1999; Vicente-Serrano *et al.*, 2003).

Uno de los métodos utilizados en el estudio fue el de los interpoladores globales utilizan datos externos (geográficos y topográficos) como variables predictivas para desarrollar los mapas de temperatura y precipitación; entre los más utilizados se encuentran las coordenadas geográficas de las estaciones climáticas, la elevación, la exposición y la pendiente. Las variables geográficas como la latitud y la longitud no mostraron tener una correlación significativa con la temperatura, la precipitación y la oscilación, por lo que no fueron tomadas en cuenta al realizar un modelo de regresión múltiple. La exposición de ladera, aunque tuvo una correlación significativa con la temperatura, no mejoró los resultados de la confiabilidad del modelo.

Fernández, (2010) en su artículo, analiza la evolución hidroclimática reciente en dos cuencas principales de la isla de Puerto Rico, utilizando como indicadores las temperaturas, las precipitaciones y los caudales de distintas estaciones de NOAA y el USGS. Estas variables inicialmente fueron analizadas en cada estación individualmente y luego se hizo un análisis conjunto de la cuenca. Con los resultados

obtenidos, en ninguna de las cuencas se pudo establecer tendencias claras en cuanto a la precipitación total anual. Aunque algunas estaciones mostraron tendencias positivas y otras regresivas, ninguna alcanzó valores estadísticamente significativos que permita rechazar la hipótesis nula de no tendencia.

Las observaciones indicaron también que en una cuenca la temperatura media anual mostró un ligero aumento, mientras que en la otra la temperatura descendió. Para el análisis de tendencias se usó el método estadístico Rho de Spearman y el de Mann-Kendall (Yue *et al.*, 2001). Ambos estadísticos son pruebas no paramétricas robustas. Por esta razón, los resultados de las temperaturas se han de tomar con prudencia, de manera que, aunque las precipitaciones no muestren tendencias regresivas, un leve aumento de la temperatura (lo que indica mayor evaporación), serían condiciones que pueden crear una tendencia regresiva en los volúmenes de agua. Esto evidencia, de una manera u otra, que las variables climáticas (temperatura) están condicionando e influyen en el comportamiento hidrológico de dichas cuencas. Sin embargo, según Tomer y Schilling, (2009) es de conocimiento común que la evapotranspiración actual está condicionada por la proporción relativa y tiempo de la disponibilidad del agua, energía disponible y sobre todo el tipo y condiciones de la cubierta vegetal.

Rivas, (2007) en su investigación incluye la caracterización de algunas características y variables hidroclimáticas (precipitación, temperatura, disponibilidad, rendimiento hídrico) en la cuenca alta del río Mocotíes, Venezuela. El cálculo de la precipitación media mensual y anual se logró a través de la aplicación del método isoyético, determinándose diferentes valores de precipitación, la aplicación de este método está basado fundamentalmente en las mediciones de áreas entre las diferentes isoyetas que se han trazado, para luego establecer una relación entre el valor medio de las isoyetas que se ubican tanto por encima como por debajo del área seleccionada y el valor de esta última en hectáreas, luego las mediciones se suman y se dividen entre el área total de la cuenca a la que se le está estimando el valor de precipitación media.

La temperatura fue estimada en función a la altitud máxima y mínima que se requerían para la aplicación de modelos estadísticos creados anteriormente; de igual

manera se identificaron los pisos térmicos, predominando los pisos templado y frío. El balance hídrico permite determinar los niveles de escurrimiento en toda la cuenca, así como los diferentes valores de exceso y déficit de agua, que a su vez conllevaron a una clasificación climática según Thornthwaite. La disponibilidad media mensual y anual fue calculada a través de una curva de variación de caudales mensuales en la estación hidrométrica Puente Victoria, la cual fue elaborada por otro autor, por lo que se debió trasponer dicha curva al área de estudio, a fin de poder estimar los datos requeridos para el cálculo del rendimiento hídrico y para efectuar un balance disponibilidad-demanda de agua. El cálculo de la demanda está basado en la aplicación de dotaciones teóricas a datos de superficie bajo riego y de población. Finalmente al llevar a cabo el balance disponibilidad-demanda se observa que no hay déficit de agua en la cuenca objeto de estudio.

A la luz de los resultados de estos trabajos, evidencia que los factores climáticos por sí solos, no pueden explicar las variaciones hidroclimáticas que se están produciendo en las cuencas y ríos estudiados. Por esta razón, se hace necesario abarcar la asimilación y estudio de esas y otras variables hidroclimáticas, para poder establecer así las pautas que permitan hacer una adecuada gestión del territorio que favorezca en cualquier caso la investigación, el mantenimiento del buen estado de los recursos hídricos de la zona de estudio desde lo particular a lo general.

Según (Méndez, 2008), la precipitación es uno de los factores principales del ciclo hidrológico y su conocimiento es indispensable para los modelos de predicción del escurrimiento, el cálculo de líneas de flujo, la estimación de áreas diferenciadas de precipitación, así como en modelos de cuencas.

La modelación de los patrones espaciales de la precipitación es relevante tanto en ciencias de la atmósfera como en hidrología. Debido a que la precipitación con frecuencia se comporta con una gran variabilidad en espacio y tiempo, como es el caso de la mayoría de la lluvia que cae sobre la Ciudad de México, realizar su estimación de manera que se capture el patrón de su variabilidad espacial no es una tarea fácil.

Olmos, (2015) evalúa la variabilidad hidroclimática desde modelos climáticos regionales a escala de la cuenca del río Segura, España Peninsular. Considerando

que la precipitación es la entrada principal al ciclo hidrológico, se toma una atención especial en su estimación. Hace énfasis en que aumentar la confiabilidad en las proyecciones de la precipitación es un requisito previo en la obtención de proyecciones hidroclimáticas precisas en las investigaciones de esta variable en cuencas hidrográficas.

El autor realiza un análisis de sensibilidad con la precipitación ensembles de RCMs considerando dos formulaciones diferentes del factor de confiabilidad (R), basadas en el método REA (Reliability Ensemble Average). Las formulaciones propuestas se basan en Funciones de Distribución Acumulativas (CDFs por sus siglas en inglés) de la variable (precipitación por ejemplo), a escala estacional y anual en un caso; o CDFs mensuales en el otro caso, trabajando para ello; tanto con bases de datos meteorológicas observadas, como simuladas. Las ecuaciones que definen el modelo se aplican a escala de celda en que se fracciona la cuenca, realizando así una modelización espacio-temporal de entradas, procesos y parámetros en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que ha permitido simular los flujos medios mensuales en cualquier punto de la red hidrográfica.

El uso de modelos hidrológicos distribuidos forzados por ensambles de RCMs constituye un enfoque válido y sólido para aumentar la confiabilidad tanto de las proyecciones climáticas como hidrológicas. El aumentar el conocimiento sobre los impactos plausibles en las distintas variables, especialmente con las distribuciones espaciales, haciendo uso del estado del arte en modelización climática e hidrológica, ayudará a construir capacidad adaptativa en las cuencas a estudiar, para hacer frente al cambio climático. Los gestores y responsables de la toma de decisión en planificación y gestión del uso del agua, requieren de mensajes claros de la comunidad científica para alcanzar un uso sostenible de los recursos.

Chica, (2006) presenta en su investigación registros gráficos y análisis de series de temperatura media anual y precipitación anual de estaciones hidroclimatológicas en El Salvador con registros superiores a 40 años, así como información de caudales medios mensuales en los meses de febrero y marzo. La longitud de los registros disponibles es una limitante para establecer un cambio en el patrón de las variables hidroclimáticas con relación a datos de siglos pasados, siendo difícil determinar si

estos cambios corresponden a un cambio climático o la variabilidad natural del clima; sin embargo, evidencian un cambio hidroclimatológico en los últimos años.

Para analizar los datos de temperatura y precipitación, se trabajó con las series anuales de estaciones que presentaran registro superior a 40 años y preferiblemente que estuvieran funcionando actualmente, con el fin de detectar algún cambio significativo en el patrón de comportamiento de las variables en dicho período. Los datos tanto de temperatura media anual, precipitación anual y caudales medios mensuales de febrero y marzo fueron graficados y se trazó la línea de tendencia de los registros.

El autor concluye afirmando que los cambios en los patrones de comportamiento de las variables hidroclimatológicas no deben ser vistos aisladamente como consecuencia de un cambio climático mundial, sin tener en cuenta que este cambio climático es producido por el aumento de gases efecto invernadero, la deforestación y reducción de áreas de bosque, el uso inadecuado de los suelos y las prácticas agrícolas inadecuadas.

Según (Moreno, 2012) son conocidos modelos espacio-temporales para establecer el nivel promedio de un caudal o de la caída de lluvia en una determinada región y un período de tiempo dado, pero muchas veces es necesario modelar las lluvias extremas, o sea la cola de la distribución. Si bien los procesos gaussianos juegan un papel preponderante en lo que se refiere a la modelación de datos espaciales, no son un camino apropiado para el ajuste de las colas de la distribución. Por otro lado, en el estudio de eventos extremos espaciales muchos conceptos dentro de la Geoestadística deben ser reformulados, por ejemplo el Variograma necesita que el momento de segundo orden sea finito, lo cual no sucede en las distribuciones de valores extremos.

Estos estudios indican la necesidad de controlar y evaluar los cambios de las variables hidroclimáticas en cuencas hidrográficas con pocos estudios y con vulnerabilidades en sus ecosistemas, para un mejor manejo y análisis de tendencias anuales en estas, demostrando en general que son útiles para el diseño de medidas de adaptación y mitigación ante variabilidad en los patrones hidroclimatológicos de las cuencas.

Puede resumirse entonces que las variables hidroclimáticas más estudiadas y caracterizadas en cuencas hidrográficas son la precipitación, escurrimiento superficial, humedad relativa, temperatura, evapotranspiración y evaporación; todas en función de los estudios de estimación de variabilidad hidrometeorológica, los modos y métodos principales de manejo integrado de estas y el análisis y evaluación de tendencias hidroclimáticas.

Para esta investigación en cuestión, donde se analizaran las variables hidroclimáticas en su comportamiento espacial, serán utilizadas las variables con mayor influencia en los procesos hidrológicos en las cuencas.

1.3.1. Variables hidroclimáticas más estudiadas en cuencas hidrográficas

Según (Lastra *et al.*, 2008) las variables hidroclimáticas que intervienen en los procesos hidrológicos en las cuencas se encuentran:

- Precipitación
- Temperatura
- Escurrimiento Superficial
- Humedad Relativa

1.3.1.1. Precipitaciones

La precipitación es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. La misma forma parte del ciclo del agua que mantiene el equilibrio y sustento de todos los ecosistemas. La precipitación se genera por la condensación de agua, o sea, la acumulación de agua en la atmósfera creando nubes. El agua que se acumula en la atmósfera generalmente se encuentra en estado gaseoso. Cuando existe una cantidad considerable de agua gaseosa dentro de las nubes el agua pasa del estado gaseoso al líquido o al sólido. El peso del agua cae de la atmósfera hacia la superficie terrestre o marítima provocando precipitaciones tanto líquidas como, por ejemplo, las lluvias o sólidas como el granizo y la nieve. Las precipitaciones líquidas como la lluvia pueden contener contaminantes que son absorbidas en la atmósfera y caen junto con la lluvia llamadas lluvias ácidas (López, 1982).

Las precipitaciones sólidas son generadas por los cambios de los estados del agua de gaseoso a líquido y rápidamente al sólido (generalmente por el frío) cuyo proceso es llamado solidificación. El proceso contrario del agua de estado sólido a líquido por otro lado se llama fusión.

La precipitación que alcanza la superficie de la tierra puede producirse en muchas formas diferentes, como lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve, aguanieve y granizo.

<https://www.fluencecorp.com/es/que-son-las-precipitaciones-pluviales/>

La precipitación es un componente principal del ciclo hidrológico, y es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta. Aproximadamente 505000 km³ de agua caen como precipitación cada año, y de ellos 398000 km³ caen sobre los océanos. Dada el área superficial de la Tierra, eso significa que la precipitación anual promediada globalmente es más o menos de 1 m, y la precipitación anual media sobre los océanos de 1,1 m. Esta es estudiada por los meteorólogos, ya que es un factor importante en el comportamiento del clima y de los fenómenos naturales (Durand, 2002).

Las precipitaciones pueden clasificarse según el mecanismo por el cual las masas de aire son obligadas a ascender como: frontales, convectivas u orográficas y de convergencia.

Precipitaciones frontales: éstas ocurren cuando chocan dos masas de distintas presiones, la fría que es pesada y la caliente que es la más ligera.

Precipitaciones convectivas: ocurren en regiones cálidas y húmedas, cuando masas de aire cálido ascienden a una altura y se enfrían generándose de esta manera las precipitaciones.

Precipitaciones orográficas: cuando una masa de aire húmedo se eleva hasta llegar a la cima de una montaña mientras asciende se enfría condensándose así el agua que este contiene por lo que se producen las precipitaciones y la masa de aire pierde humedad.

De convergencia: Son propias de las zonas ecuatoriales, donde el aire asciende por el choque de dos masas de aire de temperatura y humedad similares, procedentes de zonas cercanas de los hemisferios norte y sur, que son arrastradas por los vientos alisios. Esta convergencia provoca lluvias muy intensas.

También están las ciclónicas: son las provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones.

<http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/precipcla.htm>

Según Wolff, (2007) en el caso de la precipitación, los métodos de medición han tenido grandes avances tras la automatización de los pluviómetros, la invención del radar meteorológico y la puesta en servicio de satélites climáticos que usan tecnologías de medición infrarroja y/o de microondas, de igual forma se han mejorado los algoritmos de interpolación al incorporar en las conceptualizaciones elementos estadísticos y de la física atmosférica.

Determinación de la lluvia media hiperanual en una cuenca hidrográfica:

Las dimensiones de una cuenca hidrográfica son muy variadas y las precipitaciones también varían en el tiempo y en el espacio. Para tomar en cuenta estas diversidades y conocer el comportamiento de las lluvias, así como su magnitud en tales condiciones, es frecuente que en la misma se instalen varias estaciones pluviométricas. Para determinar la precipitación media en la cuenca se elige un período de retorno determinado, se determina la lluvia en cada estación para el período de retorno seleccionado y luego se calcula la lluvia media, para esto se utiliza alguno de los procedimientos siguientes: Aritmético, Polígonos de Thiessen, Curvas Isoyetas y el Mapa Isoyético confeccionado para cada país (Bateman, 2007). 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 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.

El método Isoyético consiste en trazar curvas de igual precipitación para un período 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 (Paulhus, 1988).

Es común encontrar regiones sin registros o con escasa información, por lo que se debe recurrir a criterios de evaluación regional. La hipótesis de la regionalización es que las lluvias importantes se presentaron en sitios próximos, lo cual genera la

ventaja de aprovechar los datos de las estaciones donde sí se registraron aquellos eventos.

<https://es.slideshare.net/NatashaMartin10/hidrologia-calculo-de-precipitacion//>

La medición de la precipitación es realmente importante pues prácticamente es la única que proporciona los aportes de agua. Sus medidas deben ser lo más correctas y precisas posibles para así obtener valores adecuadamente representativos, ya que, por alguna causa, casi siempre se va a captar menos precipitación de la que realmente cae y ésta es precisamente la característica a estudiar, con la constante amenaza además, de su enorme variabilidad, lo que puede resultar desalentador, máxime, si se tiene en cuenta que las superficies medidoras son miles de millones de veces inferiores a la superficie a analizar.

1.3.1.2. Esgurrimiento superficial

El esgurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Dicho de otra manera, es el deslizamiento virgen del agua, que no ha sido afectado por obras artificiales hechas por el hombre. De acuerdo con las partes de la superficie terrestre en las que se realiza el esgurrimiento, éste se puede dividir en: superficial, subsuperficial y subterráneo (ver figura 1.5), (Aparicio, 2004).

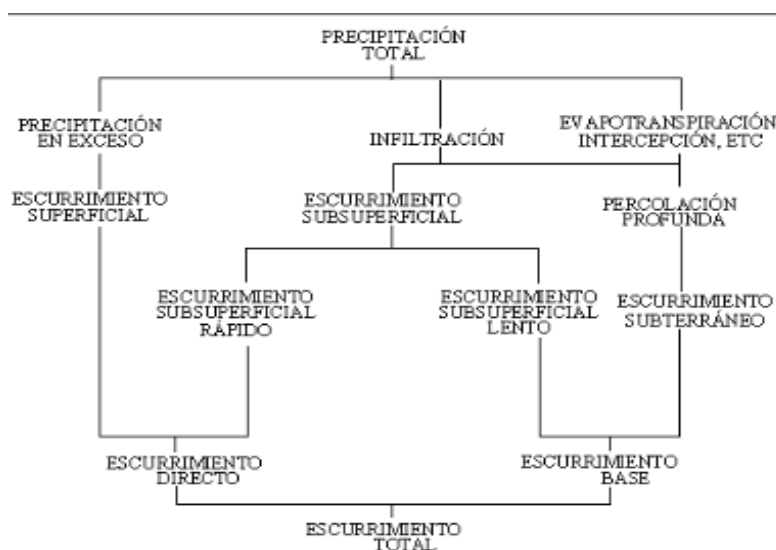


Figura 1.5.Diagrama que explica el esgurrimiento. Fuente: (Chow, 1964)

Escorrimento o escurrimiento superficial: Es la parte del agua que escurre sobre el suelo y después por los cauces de los ríos.

Escorrimento subsuperficial: Es la parte del agua que se desliza a través de los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Una parte de este tipo de escurrimiento entra rápidamente a formar parte de las corrientes superficiales y a la otra le toma bastante tiempo el unirse a ellas.

Escorrimento subterráneo: Es aquél que, debido a una profunda percolación del agua infiltrada en el suelo, se lleva a cabo en los mantos subterráneos y que, posteriormente, por lo general, descarga a las corrientes fluviales.

A la parte de la precipitación que contribuye directamente al escurrimiento superficial se le llama precipitación en exceso. El escurrimiento subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial constituyen el escurrimiento base de los ríos. La parte de agua de escurrimiento que entra rápidamente en el cauce de las corrientes es a lo que se llama escurrimiento directo y es igual a la suma del escurrimiento subsuperficial más la precipitación que cae directamente en los cauces.

Según Maurillo, (2007) el ciclo de escurrimiento se compone de varias fases:

Fase 1. Se refiere a un período sin lluvia, que corresponde a la época de estiaje. Durante esta fase el nivel de las aguas freáticas es bajo y está descendiendo continuamente.

Fase 2. Período inicial de la lluvia, ésta se divide en precipitación directa en el cauce, intercepción por la vegetación, retención en depresiones, e infiltración. El agua que infiltra ocasiona un incremento gradual de agua en la zona de aireación. El escurrimiento es casi nulo (excepto en suelos impermeables).

Fase 3. Se refiere a la presencia de una lluvia de intensidad variable y más o menos prolongada. Satisface la intercepción y la retención superficial, el exceso de lluvia se transforma en escurrimiento.

El escurrimiento ocurre cuando la lluvia excede la infiltración, pudiendo llegar a uno de los cauces naturales en función de la capacidad de retención de los suelos. El agua que infiltra satura la zona de aireación, la napa comienza a elevarse y el escurrimiento subterráneo se incrementa hasta contribuir al escurrimiento superficial.

Como la zona de aireación está saturada, también contribuye al escurrimiento subsuperficial.

Fase 4. El nivel freático se eleva constantemente hasta que el escurrimiento subterráneo se equilibra con la capacidad máxima de recarga posible y toda la lluvia se convierte en incremento directo del escurrimiento superficial (sucede especialmente en zonas bajas con prolongadas lluvias).

Fase 5. Comprende al período entre la terminación de la lluvia y el momento en que es alcanzado el máximo nivel de aguas. El agua que se encuentra en la zona de aireación es alcanzada por los niveles freáticos. El escurrimiento superficial es mantenido por los escurrimientos subsuperficiales y subterráneos que afloran, así como por los pequeños almacenamientos superficiales.

<http://www.fdt-valles.org/pdfs/fdta/Escurrecimiento%20Superficial.pdf//>

Dentro de los métodos de cálculo del escurrimiento 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 Hidrometeorológica.
- Método de las isócronas.

En este trabajo se utiliza el método de Fórmulas Clásicas, el cual se explica a continuación:

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:

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

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

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

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

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

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

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

1.3.1.3. Temperatura

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor medible mediante un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como energía cinética, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que este se encuentra más «caliente»; es decir, que su temperatura es mayor (Zemansky, 2018).

El desarrollo de técnicas para la medición de la temperatura ha pasado por un largo proceso histórico, ya que es necesario darle un valor numérico a una idea intuitiva como es lo frío o lo caliente. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin (K), y la escala correspondiente es la escala Kelvin o escala absoluta, que asocia el valor «cero kelvin» (0 K) al «cero absoluto», y se gradúa con un tamaño de grado igual al del grado Celsius. Sin embargo, fuera del ámbito científico el uso de otras escalas de temperatura es común.

La temperatura es una variable fundamental para casi cualquier situación y proceso atmosférico no solo en el comportamiento espacial de esta en las cuencas hidrográficas, sino también para la vida en el planeta. Un correcto control y gestión

de la temperatura se vuelve fundamental para garantizar un manejo sostenible y sustentable de los recursos naturales (Olken, 2008).

1.3.1.4. Humedad Relativa

La humedad relativa (RH) es la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de equilibrio del agua a una temperatura dada. La humedad relativa depende de la temperatura y la presión del sistema de interés. La misma cantidad de vapor de agua produce una mayor humedad relativa en el aire frío que en el aire caliente.

Si el aire no está saturado, la cantidad de agua contenida en la unidad de volumen es, aproximadamente, proporcional a la tensión de vapor lo tanto, el valor aproximado de la humedad relativa puede determinarse con ayuda de la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad relativa}(\%) = \left(\frac{\text{Tensión real de vapor}}{\text{Tensión de vapor saturante a la temperatura del aire}} \right) * 100$$

La humedad absoluta y específica, aumentan paralelamente con la temperatura mientras la humedad relativa es inversamente proporcional a la temperatura al menos en las zonas bajas de la atmosfera donde su valor mínimo corresponde a las horas de mayor calor y el máximo a las madrugadas.

1.4. Concepto de variabilidad hidroclimática

Según Domínguez, (2015) la variabilidad hidroclimática se puede ver como el resultado de la composición de un conjunto de elementos que se encuentran presentes en el proceso hidroclimático, entendiendo este como el acople de los diferentes elementos del balance hídrico. La Figura 1.6 presenta la propuesta una propuesta del concepto de variabilidad hidroclimática, explicada desde los distintos factores que, a nuestro entendimiento, son sus principales descriptores.

Se puede hablar, entonces, de que la variabilidad hidroclimática está compuesta por dos elementos: el patrón principal y la desviación del patrón principal. El patrón principal se puede entender como aquel mecanismo que está presente en el sistema hidroclimático y que está fuertemente marcado a través de ciclos de baja o alta

frecuencia (estacionalidad, ciclos seculares) y a través de procesos que se pueden detallar por medio del mismo proceso (inercia y tendencia). La desviación del patrón principal se ve reflejada a través de la influencia que tienen algunos fenómenos recurrentes en el comportamiento del proceso hidroclimático en estudio, estos fenómenos pueden variar con respecto a la localización espacial y temporal, y a diferencia de los elementos del patrón principal, estos no están presentes en proceso per sé. Finalmente, se tiene dentro de la variabilidad hidroclimática un componente de aleatoriedad en el que se enmarcan aquellos elementos que obedecen al azar, y que no pueden ser explicados a través de los demás elementos.

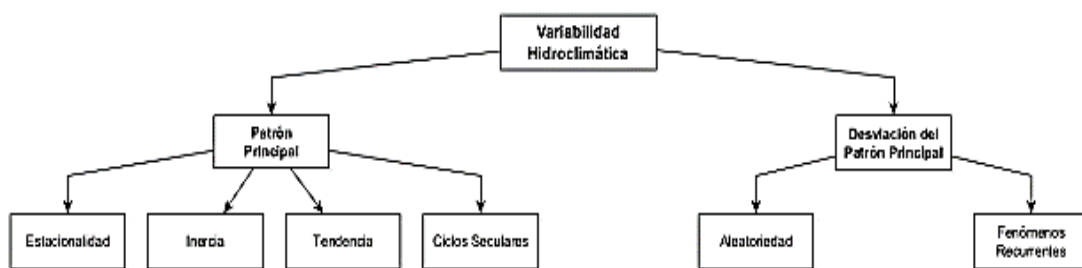


Figura 1.6. Diagrama conceptual de variabilidad hidroclimática. Fuente: Domínguez, (2015).

El entendimiento de los procesos hidroclimáticos reflejados a través de estos componentes, van a permitir el mejoramiento del pronóstico hidrológico.

Los fenómenos hidroclimáticos tienen componentes deterministas y de aleatoriedad; de este modo, se tiene un sistema gobernado por la física, en el cual, iguales estados del sistema pueden generar resultados distintos. Esa posibilidad de distintos resultados es entendida desde la estadística y la física como variabilidad. Estadísticamente, la variabilidad se puede identificar como qué tan cerca, o lejos, se encuentran los datos en un conjunto estadístico con respecto a un valor central, entre más grande es esta, menor representatividad o confianza brinda el valor esperado; por el contrario, si esta es pequeña, existe una gran uniformidad en el conjunto de datos (Bautista, 2002).

1.5. Ejemplo de equipos para medir las variables hidroclimáticas

En la modelación espacial de las variables hidroclimáticas, se debe partir del levantamiento de valores puntuales y del comportamiento de estas variables en la

zona de estudio, para esto es necesaria la utilización de equipos de mediciones. Los instrumentos dan un valor exacto del parámetro. Para que las observaciones realizadas en distintos lugares sean comparables, tanto el instrumental, como su ubicación e instalación dentro de las estaciones de medición están estandarizados. En el estudio de la literatura referida a esta temática, se pudieron encontrar que en el mundo utilizan diferentes equipos de mediciones (ver anexo 1 y anexo 2), con características específicas según las variables a medir. Tal es el caso de los siguientes equipos:

- Anemómetros rotatorios
- Termómetro de máxima y mínima
- Medidor ambiental multifuncional
- Anemómetro
- Psicrómetro
- Termohigrómetro
- Pluviómetro

1.6. Software para la realización de los modelos espaciales

Constituye una tarea muy compleja, el administrar, regular, controlar y planificar las acciones que se desarrollan en una cuenca hidrográfica, donde se vinculan e interrelacionan muchos actores. En este sentido, identificar las variables que intervienen en el proceso de gestión, desarrollo y protección, permite conocer una parte del problema, que usualmente se logra a través de la recopilación y análisis de la información y del diagnóstico ambiental de la cuenca.

En la aplicación del método de modelación espacial de las variables hidroclimáticas se pueden utilizar varios software específicamente los conocidos como Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés (Geographic Information System)). En esta investigación se utilizará MAPINFO Professional (SIG).

Capítulo 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se hará un análisis de la metodología de trabajo y los métodos para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación. Se realizará una caracterización detallada de las principales variables hidroclimáticas y de los procedimientos científicos realizados para modelar y reconocer su comportamiento espacial en las cuencas a estudiar.

2.1. Metodología de trabajo

Teniendo cuenta que es necesario realizar un diseño teórico donde se señalen las diferentes etapas por las que transita esta investigación, en la figura 2.1 se muestra el esquema de la metodología de trabajo donde se expone el procedimiento científico-técnico que da respuesta a las tareas y objetivos planteados para la modelación espacial de las variables hidroclimáticas en las cuencas en la monografía.

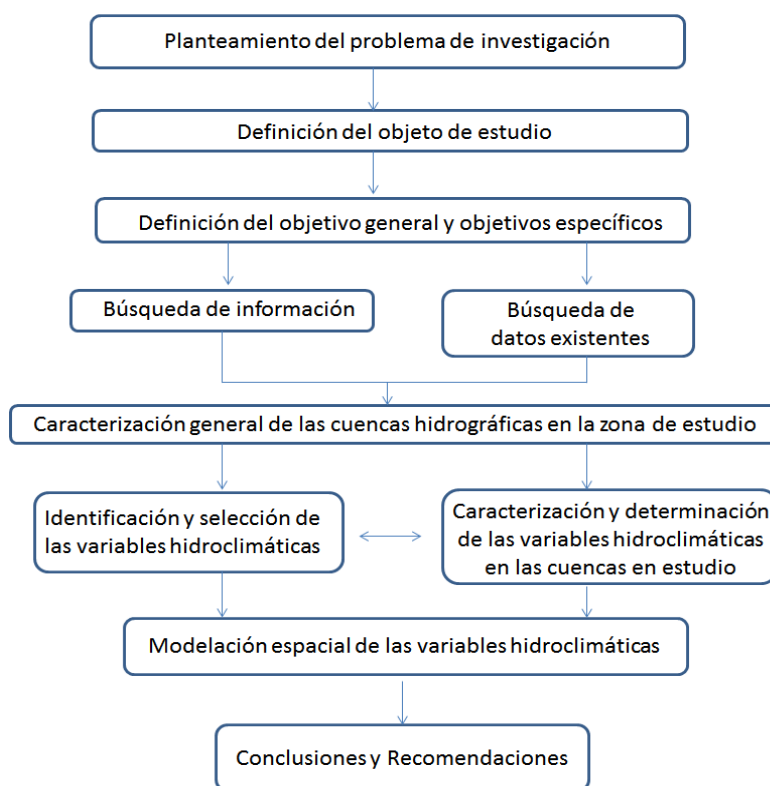


Figura 2.1. Esquema de la metodología de trabajo utilizada. Fuente: Elaboración propia

Estrategia metodológica

En una primera etapa, la indagación y compilación de toda la información, esta encierra el proceso de búsqueda y análisis de toda la información relacionada con el problema de estudio y con los procesos de variabilidad hidroclimática, además se realiza una recopilación, depuración y análisis de los materiales cartográficos básicos existentes en la provincia.

En esta fase se obtiene como resultado toda la información precisa para la caracterización y modelación de las variables hidroclimáticas a partir de la pesquisa y del análisis del software conocido como SIG.

Cumpliendo con la etapa de caracterización se analizan los aspectos físico-geográficos y morfológicos de la zona de estudio. Se obtienen los resultados realizados por la previa búsqueda de la bibliografía, lo cual permite evaluar las posibles problemáticas ya su vez se identificar los procesos y desequilibrios eventuales; los cuales propician conocer los impactos desfavorables que pueden incidir en la zona de estudio.

Para hacer el análisis y medición de las variables hidroclimáticas, el trazado y reconocimiento de las principales características de las cuencas hidrográficas en cuestión se tienen en cuenta los resultados obtenidos en tratados anteriores y los datos históricos brindados por INRH y el Instituto de Meteorología (INSMET).

En la segunda etapa de identificación y selección de las variables hidroclimáticas, se caracterizan de las variables más estudiadas en cuencas hidrográficas y se utilizan los datos promediales de la temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima. La humedad relativa se mide con el instrumento higrómetro (Ver anexo1). La precipitación es medida por un instrumento meteorológico llamada pluviógrafo (ver anexo1) o se puede determinar empleando los distintos métodos descritos en la literatura referidos en el capítulo1 (Método Aritmético, Método Isoyético, Método de Polígonos de Thiessen, entre otros). En la tabla 2.1 se muestran las estaciones pluviométricas de la zona.

Tabla 2.1. Estaciones pluviométricas. Fuente: INRH, (2019).

Nombre del Equipo	No de	No de	Coordenadas		Altitud	Año de
	Control	Cuenca	N	S		Inicio
Manantuaba	1118	50763	158,3	598,5	25	1962
Presa Parada	1331	50763	153.3	597.3	190	1970
La Lucha	1334	50763	155,2	590,5	140	1963
El Cobre	1529	50763	155.5	592.9	80	1966
Presa Chalons	1486	50763	157.9	606.7	40	1963
D.P.R.H.	1663	50763	157.9	606.7	60	1963
Santiago 1	1643	50763	152.5	605.5	45	1987

De igual forma pueden emplearse los datos aportados por el mapa isoyético nacional (ver figura 2.2), rectificado con los valores de estaciones pluviométricas cercanas a las cuencas, en el proceso de análisis espacial el escurrimiento será calculados por métodos comúnmente usados en este caso las formulas clásicas. En este proceso de identificación de las variables que intervienen en los procesos de variabilidad hidroclimáticas en las cuencas hidrográficas, es necesario identificar cuáles son las variables que luego serán modeladas; estas fueron escogidas a partir del problema de estudio y posterior al análisis de la bibliografía referente a esta temática.

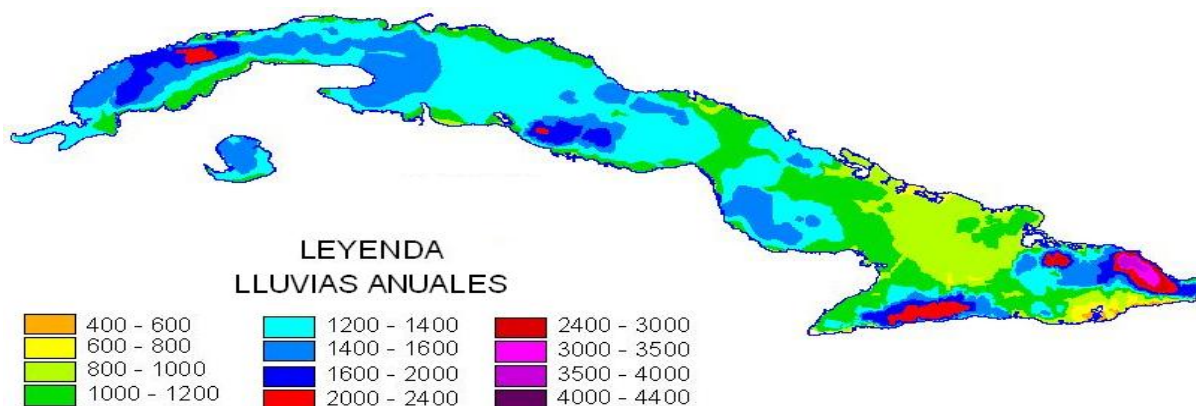


Figura 2.2. Mapa Pluviosidad de Cuba. Última versión. Fuente: CITMA, 2018

En esta investigación para el estudio de las variables en la zona se trabajó con los datos mensuales e hiperanuales alcanzados en las mediciones en estación Universidad de Oriente (ver figura 2.3), en el período de los últimos 5 años principalmente, representativa para ciudad de Santiago de Cuba; de igual forma se

toman en cuenta los pluviómetros ubicados en las cuencas hidrográficas en cuestión y los instrumentos de medición de la precipitación cercanos o limítrofes a estas. En la modelación, se enmarca el proceso de análisis de los datos recopilados de las variables hidroclimáticas y la elaboración de los modelos espaciales de las mismas, para observar así cómo actúan o como intervendrán éstas en los procesos cíclicos y de variabilidad hidrometeorológicos en las cuencas a evaluar.



Figura 2.3. Plazoleta Estación Meteorológica Universidad. Fuente: (Martínez ,2017)

En la tercera etapa de modelación espacial. Esta se realizó utilizando una de las herramientas del Sistema de información Geográfica (SIG), con el objetivo de observar y determinar la relación existente entre ellas y tener un mayor control de su comportamiento en el área de estudio. Para el caso del escurrimiento superficial es necesario trasladar los valores obtenidos por coordenadas de cierre a un SIG, asumiendo los parteaguas como de valor Cero, debido a que es aquí donde comienza el escurrimiento en la cuenca.

Se modela espacialmente el comportamiento de las variables en análisis, de manera que se obtenga un modelo donde se consiga observar geográficamente estas en un área determinada de las cuencas. Con la ayuda del cursor, el especialista se puede mover en el mapa y obtener en cualquier punto los valores de las variables hidroclimáticas a estudiar.

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, de la variabilidad hidroclimáticas 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 generales de las cuencas en cuestión, describiéndolas se tendrá un mayor volumen de información y una mejor comprensión y dominio para un manejo más integrado de estas.

2.2. Características físico-geográfica general del área de estudio.

El área de estudio está comprendida por tres cuencas, ubicadas en una misma región hidrográfica, la cuenca hidrográfica de los ríos Guaos-Gascón que fueron unidos con la ampliación de la Avenida 40 (año 1991), desviándose el cauce del río Gascón; actualmente en la desembocadura confluyen los dos ríos, desembocando ambos en un mismo punto, al Norte de la ensenada del Miradero en la bahía santiaguera (Bolaños, J 2004). También está como área de estudio la cuenca del río Yarayó que también tributa sus aguas a la bahía santiaguera.

Estas cuencas forman parte del municipio Santiago de Cuba, ubicadas en la cuenca de mismo nombre; por su ubicación y por estar encajonada en una gigantesca depresión u hoyo hace que la temperatura sea muy elevada al no recibir directamente la influencia de los vientos alisios, ni las brisas marinas, por esta razón Santiago de Cuba es la región de más alta temperatura media anual. La cuenca de Santiago de Cuba se encuentra localizada en la vertiente Sur de la Sierra Maestra, limitada al Norte por la Sierra de Boniato, al Sur por el Mar Caribe, al Este por el Río San Juan y al Oeste por el Río Gascón. Su principal accidente geográfico lo constituye la Bahía de Santiago.

2.2.1. Características de las cuencas hidrográficas Guaos-Gascón y Yarayó.

A continuación, se realiza la caracterización actualizada de la cuenca de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó, atendiendo a los aspectos de geomorfología, clima, hidrología, suelos, relieve entre otros.

2.2.1.1. Cuenca de los ríos Guaos-Gascón

Estos ríos fueron unidos con la ampliación de la Avenida 40 (año 1991), desviándose el cauce del río Gascón por las inversiones realizadas en el cambio de la entrada del ferrocarril a la ciudad de Santiago de Cuba, la construcción de la Terminal Ferroviaria

“General de División Senén Casas Regueiro”, así como la ampliación del Paseo de Martí y el levantamiento de un puente elevado al final de la avenida, que entronca con la carretera hacia la Refinería, Mar Verde y Guamá, por la zona baja del cual se canalizó el río, que luego corre por un cauce rectificado hasta incorporarse su similar Los Guaos por la parte frontal de los Almacenes Universales S.A., de donde se infiere que el río Gascón es afluente de Los Guaos y ambos conforman la cuenca hidrográfica de los cursos hídricos Los Guaos-Gascón (ver figura 2.4).



Figura 2.4. Incorporación del río Gascón en el río Los Guaos. Fuente: (Mustelier, 2017).

Actualmente, en la desembocadura confluyen los dos ríos, por lo tanto ambos desembocan en un mismo punto, al Norte de la ensenada de Miradero en la bahía santiaguera, tributando a la bahía una agresiva carga contaminante generada por las industrias de materiales de la construcción pertenecientes al Combinado “Los Guaos” (Bolaños, 2004). Todas estas acciones antrópicas identificadas más otras detectadas provocan dificultades y alteraciones en la cuenca hidrográfica. Por esto se realiza un estudio como una cuenca unificada (ver figura 2.5).

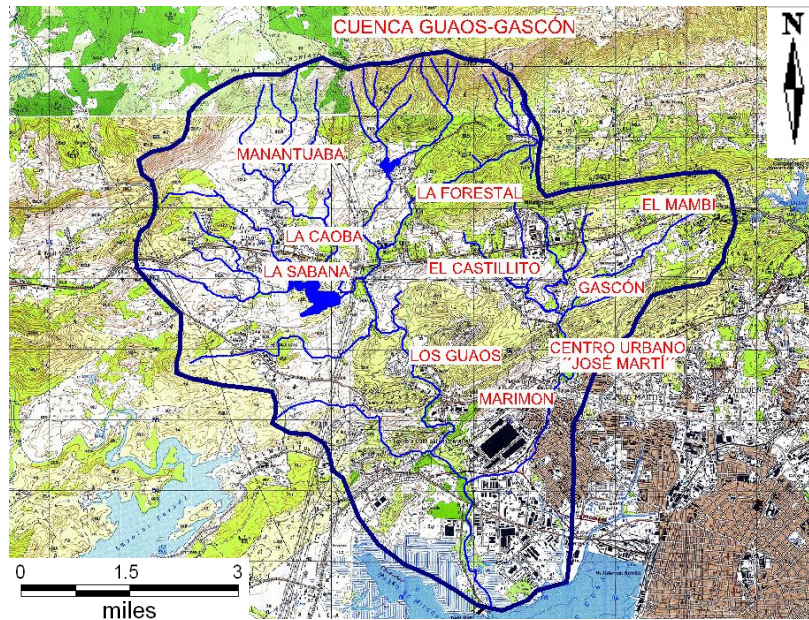


Figura 2.5. Cuenca hidrográfica de los ríos Los Guaos-Gascón .Fuente: INRH, (2019).

La cuenca hidrográfica de los ríos Lo Guaos-Gascón se localiza en la parte oeste de la ciudad de Santiago de Cuba, limitada por las cuencas de los ríos Ollao y el Cocal, al sur por la bahía de Santiago de Cuba, al este por la ciudad de Santiago de Cuba y el poblado de Cuabitas y al oeste por la cuenca del río Parada y cuenta con un área de 34,5 km².

Está conformada por dos ríos Los Guaos y Gascón; el río Gascón tiene su nacimiento en el Mambí a 3,7 Km a unos 100 m.s.n.m, al Este-Noroeste del poblado El Castillito, en los 20°04'15"latitud Norte y los 75°49'51" longitud Oeste, a 85,0 m de altitud, tiene un largo de 6,5 Km y corre en dirección Este–Sur. Su corriente es permanente pero de poco caudal, limita al norte con las estribaciones de la Sierra de Boniato y con el río El Cocal, al Sur con la Bahía de Santiago de Cuba, al Este con la cuenca del río Yarayó y al Oeste con la cuenca de Guaos.

El río Los Guaos nace a 2,7 Km. cercano a Loma La Cruz a unos 120 m.s.n.m, fluyendo sus aguas a la Bahía de Santiago y al Noroeste del asentamiento El Castillito, en los 20°05'12" latitud Norte y los 75°52'27" longitud Oeste, a 260,0 m de altitud tiene una extensión de 25 km² y una longitud de 12,2 Km. y corre en dirección Norte-Sureste. Se localiza al Noroeste de la cuenca de Santiago de Cuba.

Los parámetros físico-geográficos obtenidos se brindan en las tabla 2.2 y 2.3 obtenidos de hojas cartográficas a escala 1:50 000 a partir del INRH.

Tabla 2.2. Características morfométricas. Fuente: (INRH, 2019)

Río	Coordenadas		A _c (Km ²)	Hm (m.s.n.m.)	L _r (Km)	Y _R (‰)	Y _C (%)	D Km/Km ²
	N	E						
Gascón	603.00	152.700	9.5	56	5.7	13.8	37.5	1.02

Tabla 2.3. Características morfométricas. Fuente: INRH, (2019)

Río	Coordenadas		A _c (Km ²)	Hm (m.s.n.m.)	L _r (Km)	Y _R (‰)	Y _C (%)	D Km/Km ²
	N	E						
Guaos	603.300	152.700	25	80	8.24	14.6	11.2	1.08

Donde:

Ac - Área de la cuenca en Km²

Hm- Altura media de la cuenca en m

Lr – Longitud del río en Km

Yr- Pendiente del río en ‰

Yc – Pendiente media de la cuenca en ‰

D – Densidad de Drenaje Km/Km²

Geología

La cuenca está constituida por las siguientes formaciones geológicas: formación Santiago, formación Río Macío, formación El Cobre, miembro El Caney y algunos afloramientos de rocas vulcanógenas.

- **Formación Río Macío:** Se extiende en la cuenca y orillas del río El Cobre y está constituida por bloques, cantos rodados, gravas, aleuritas, arenas y arcillas derivadas de la erosión fluvial y regional. Se caracteriza por los distintos tipos de sorteamientos, yacencia y redondeo de los fragmentos que la componen; en su secuencia se distinguen los sedimentos de los períodos relativamente secos hasta los depositados durante las perturbaciones ciclónicas; la estratificación suele ser cruzada y lenticular.

- **Formación Santiago:** Se desarrolla en la parte noroeste de la bahía de Santiago de Cuba y está representada por arcillas arenolimosas, calcáreas, friables, finamente estratificadas con concreciones de CaCO_3 , de color carmelitoso y a veces con tonalidades grisáceas.
- **Formación El Cobre:** Está ampliamente distribuida a través de la Sierra Maestra, forma una franja meridional y regular estrecha de extensión a lo largo de la costa sur de las provincias de Santiago de Cuba y Granma. Su mayor parte se halla representada por rocas andesíticas, tanto efusivas como vulcanógenas sedimentarias, aglomeradas, tobas en todas sus combinaciones, tufitas (mayormente calcáreas) y además por intercalaciones en distintas partes de lentes y capas de calizas organogenias y calizas tobáceas.
- **Miembro El Caney:** Se localiza en los horizontes superiores de la formación El Cobre y ocupa áreas relativamente extensas, con perfiles característicos. Consiste en rocas tufogénicas (tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas) bien estratificadas que forma ritmo o ciclos, usualmente en capas finas, aunque también contiene lapiditas que conforman capas más gruesas, así como a veces subordinadamente una intercalación de lavas, otras tobas y aglomerados (Guerra Ojeda, A. M y Filiu Carvajal, Marino, 1999).

Clima

El régimen climatológico de la cuenca se caracteriza por un bajo nivel de lluvia (1100 mm); según los datos del mapa isoyético de 56 años, está enmarcada en los límites de zonas semiáridas de la costa sur de las provincias orientales. El período húmedo se prolonga desde mayo hasta noviembre y el seco desde diciembre hasta abril. En esta cuenca fue necesario ejecutar rectificaciones del río Gascón, así como en cada construcción cercana a la desembocadura, de donde se derivó y es preciso realizar estudios hidrológicos para evitar inundaciones periódicas, pues las intensas lluvias producen daños económicos.

Hidrología

Las condiciones hidrogeológicas de la cuenca están basadas en las características de las rocas que la conforman: las formaciones geológicas que cubren el territorio que ocupa.

Relieve

El relieve de la zona no es accidentado. Sus laderas son enyerbadas. De vegetación abundante y variada. En su parte Norte donde las alturas máximas oscilan entre 200 – 100 m suavizándose hasta los 20 m. El río denominado Gascón es de corriente permanente ya que en todas las épocas del año existe escurrimiento superficial, y nace en la cota 100 m.

Suelos

Los suelos característicos de la cuenca son pardos con carbonatos, pardos sin carbonatos, aluviales y esqueléticos.

Naturalidad y longitud de la cuenca

El desarrollo acelerado y no sustentable ha incidido sobre la naturalidad de los cursos fluviales, pues además de haberse modificado el cauce por problemas de drenaje en las partes bajas, los asentamientos poblacionales han cambiado el entorno natural, toda vez que se han tomado áreas para establecer cultivos y se ejecutan cárcavas para la extracción de áridos. Estas corrientes han estado a merced de la depredación del hombre y de sus negativos efectos; pero su longitud no ha sido modificada, pues en el río principal no se han construido obras hidráulicas que atenten contra ello (Guerra Ojeda, A. M y Filiu Carvajal, Marino, 1999).

Flora y fauna

En el área más cercana a la ciudad, la cuenca ha sufrido una depredación considerable por parte del hombre, primero atribuible al desarrollo industrial y urbanístico y segundo a la supervivencia de las poblaciones para mantener su propio hábitat, las cuales han destruido a su paso bosques naturales, condiciones ecológicas de la fauna por la caza fortuita y otras. Con respecto a la fauna existen infinidad de especies de vertebrados e invertebrados, estos últimos de mayor abundancia y representados en un número considerable por insectos de los más característicos de la región oriental. Entre las aves más frecuentes se incluyen el

gavilán, el vencejo negro, la paloma, el pitirre real y otros. Los reptiles más comunes son: el chipoyo verde, la bayoya y la ranita, por mencionar algunos.

2.2.1.2. Cuenca del río Yarayó

La cuenca hidrográfica del río Yarayó se encuentra ubicada al este de la provincia de Santiago de Cuba tiene un área de 14 km², limitada por las cuencas de los ríos Guaos-Gascón y al este con la cuenca del río San Juan, se encuentra ubicada en el barrio del mismo nombre (ver figura 2.6).

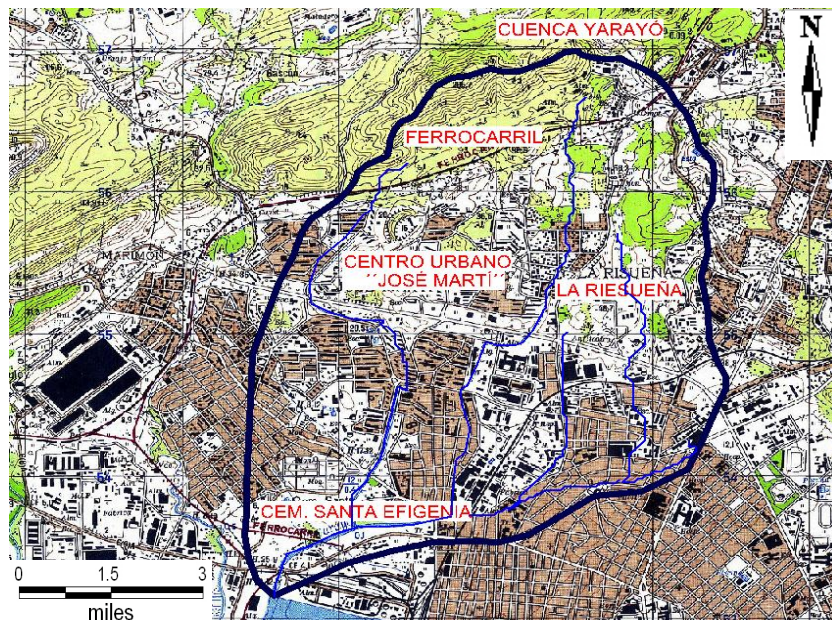


Figura 2.6. Ubicación Cuenca Hidrográfica del río Yarayó. Fuente: INRH (2019)

El río Yarayó nace en las inmediaciones de la ciudad en la cercanía de Las Cuabas al Noreste del poligráfico Sierra Maestra en los 20°02'18" latitud Norte y los 75°48'28" longitud Oeste, a 15,0 m de altitud es de poco caudal y corta longitud, constituía los límites Norte y Sur de la ciudad a finales del siglo XIX. En la actualidad se encuentra canalizado desde la Avenida Las Américas hasta la calzada de Crombet y la avenida de Yarayó área del antiguo matadero Cuqui Boch. Desemboca en la bahía en los 20°51'36" latitud Norte y los 75°50'35" longitud Oeste, al Noroeste de la ciudad en la zona 1 del puerto Guillermón Moncada. Tiene una longitud de 7,0 Km. y corre en dirección Este-Suroeste. Su corriente es permanente. En su curso medio bajo se

conectan los drenajes pluviales de San Pedrito, La Risueña, José Martí Norte y Sur y Santa Elena, además recibe las descargas de colectores de los repartos Los Olmos, Sueño, Plaza de la Revolución y Quintero, el río desemboca en el extremo noreste de la bahía de Santiago de Cuba.

Las características presentes en la Cuenca Hidrográfica del río Yarayó se encuentran conformados por particularidades físico-geográficas típicas, combinándose elementos, atributos y relaciones pertenecientes a fenómenos naturales, que ejercen gran influencia en la zona: geólogo, climáticos, hidrológicos (ver tabla 2.4).

Tabla 2.4. Características morfométricas. Fuente: (INRH, 2019)

Río	Coordenadas		A _c (Km ²)	Hm (m.s.n.m.)	L _r (Km)	Y _R (‰)	Y _C (%)	D Km/Km ²
	N	E						
Yarayó	153.100	603.600	14	28	7	14.6	14.5	1.06

Suelos

Los suelos de acuerdo a su localización en las diferentes zonas geográficas de la cuenca Yarayó se encuentran sometidos a limitaciones tales como hidrometría, acumulación de sales, rocosidad, pendientes y erosión. Teniendo en cuenta que estas influyen negativamente en los suelos; los mismos se categorizan como medianamente productivos (BIOECO, 2003).

Clima

Climatológicamente se reconocen dos estaciones o períodos, uno que va desde noviembre a abril, denominado poco lluvioso, donde las variaciones del tiempo y el clima se hacen más notables, con cambios bruscos en el tiempo diario, asociados al paso de sistemas frontales, a la influencia anticiclónica de origen continental y de centros de bajas presiones extra tropicales. En el período de mayo a octubre, denominado lluvioso, por el contrario, se presentan pocas variaciones en el tiempo, con la influencia más o menos marcada del Anticiclón del Atlántico Norte. Los cambios más importantes se vinculan con la presencia de disturbios en la circulación tropical (ondas del este y ciclones tropicales) (Montoya, 2012). En sentido general podemos señalar que el territorio se caracteriza por presentar un clima con

predominio de condiciones tropicales marítimas, estacionalmente húmedo y como factores determinantes en la formación del clima se identifican la recepción de altos valores de radiación solar durante todo el año, la marcada influencia de las características físico-geográficas y las particularidades de la circulación atmosférica (Montoya, 2012).

Flora y fauna

En las partes más alejadas de la urbanización se encuentran restos de formaciones arbóreas que conservan la biodiversidad en la cuenca, fundamentalmente en las zonas altas, aunque en algunas áreas han sufrido los efectos de erosión del medio. Entre las especies fanerógamas y biotitas existen grandes cantidades, que están distribuidas por toda la cuenca.

Con la categoría de vectores biológicos se encuentran varias especies faunísticas introducidas y no introducidas, que pueden causar notorias afectaciones al hombre y a la fauna de la región, entre las que se distinguen la mangosta (*Herpestes javanicus*), la Rata (*Rattus rattus*) y el Guayabito (*Mus musculus*). Por otra parte, existen grupos de insectos de gran importancia médico-veterinaria, considerados como potenciales transmisores de agentes patógenos para el hombre y los animales, o como plagas que afectan a las plantaciones y cultivos de interés económico.

Naturalidad y longitud de la cuenca

El desarrollo acelerado y no sustentable ha incidido sobre la naturalidad de los cursos fluviales, pues además de haberse modificado el cauce por problemas de drenaje en las partes bajas, los asentamientos poblacionales han cambiado el entorno natural, toda vez que se han tomado áreas para establecer cultivos y se ejecutan cárcavas para la extracción de áridos. Estas corrientes han estado a merced de la depredación del hombre y de sus negativos efectos.

2.3. Descripción de las variables hidroclimáticas

En sentido general y debido a que no se encuentran equipos de medición en cada una de las zonas de estudio para poder caracterizar el comportamiento espacial de las variables en cuestión, se puede señalar que el territorio donde se encuentran

enclavado las cuencas (ciudad Santiago de Cuba) se caracteriza por presentar un clima con predominio de condiciones tropicales marítimas (Domínguez, E., 2015), estacionalmente húmedo. Como factores determinantes en la formación del clima se identifican la recepción de altos valores de radiación solar durante todo el año, la marcada influencia de las características físico-geográficas y las particularidades de la circulación atmosférica.

Temperatura

El comportamiento del proceso de la temperatura media, determinado y evaluado por Instituto de Meteorología (INSMET), muestra los cambios que han sucedido en los valores anuales de temperatura desde 1981 hasta el 2018, se observa que en los años 1982, 1986, 1987, 1994, 2003, 2005, 2008, 2015, 2016 y 2017 se presentaron valores promedios más alto que comprenden valores entre los 27,0°C, 27,1°C, 27,8°C y 27,9°C y los valores más bajos se observaron en los años 1987, 1993, 1996, 1999, 2002, 2006 y 2011 con valores que corresponden entre los 26,2°C, 26,3°C, 26,4°C y 26,5 °C, se observa que en la línea tendencial logarítmica en los últimos 10 años la temperatura media anual es a subir. Esto se muestra en los cambios en la temperatura máxima media en todo el período de análisis de 1981 al 2018 un incremento en la variable temperatura máxima media, observándose que los años 2014, 2015, 2016 y 2017, con valores que oscilaron entre 32,3 °C, 32,7 °C y 32,8 °C, El régimen de temperaturas se caracteriza por alcanzar un valor medio anual de 26,1 °C. Las mínimas medias se registran durante los meses de enero y febrero (20,4 y 20,5 °C respectivamente) y las máximas medias durante julio-agosto con 33,9 y 34,0 °C (ver figura 2.7).

- Datos obtenidos de estudios preliminares específicamente en la cuenca hidrográfica Guaos-Gascón la temperatura media es de 25.5°C, los meses más calurosos son julio y agosto con temperaturas de 26 a 27° C y los más fríos Enero y Febrero con temperatura de 23,5 a 24 °C.
- En la cuenca hidrográfica de Yarayó la temperatura media es de 25,5 °C, los meses más calurosos son Julio y Agosto con temperaturas de 26 a 27 ° C y los más fríos Enero y Febrero con temperatura de 23,5 a 24 °C.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	24.1	24.2	25	25.8	26.7	27.2	28.1	28	27.7	26.8	25.9	24.7
Temperatura mín. (°C)	18.5	18.7	19.5	20.4	21.7	22.3	22.8	22.6	22.3	21.9	20.9	19.5
Temperatura máx. (°C)	29.7	29.7	30.6	31.3	31.7	32.2	33.4	33.5	33.1	31.8	30.9	29.9
Temperatura media (°F)	75.4	75.6	77.0	78.4	80.1	81.0	82.6	82.4	81.9	80.2	78.6	76.5
Temperatura mín. (°F)	65.3	65.7	67.1	68.7	71.1	72.1	73.0	72.7	72.1	71.4	69.6	67.1
Temperatura máx. (°F)	85.5	85.5	87.1	88.3	89.1	90.0	92.1	92.3	91.6	89.2	87.6	85.8

Figura 2.7.Datos históricos del tiempo Santiago de Cuba. Fuente: INSMET, (2018).

Precipitación

Los resultados de investigaciones históricas proporcionadas por INRH y el Instituto de Meteorología (INSMET) sobre diversas variables hidrológicas permiten reconocer a la precipitación como la variable que tiene mayor grado de variabilidad espacial. Reconociendo la estrecha relación de dependencia entre la lluvia y el escurrimiento, así como las dificultades reales en la obtención de información sobre los regímenes hídricos en las cuencas, es deducible la importancia estratégica que reviste el conocimiento más exacto del campo pluviométrico nacional y en este caso provincial. La distribución de la precipitación es extremadamente variable en las tres cuencas en estudio.

Esto se debe a que los períodos y las duraciones de las corrientes ascendentes que originan las lluvias no dependen solo de la irradiación, sino también de las masas de aire procedentes de las regiones limítrofes, que desempeñan un papel muchas veces preponderante, ya que en ocasiones, estaciones que solo distan 5 km o menos, presentan 20 % o más de diferencia en la lluvia de un mismo día, no caben dudas de que las corrientes ascendentes producidas por el calentamiento excesivo de ciertas zonas, influyen considerablemente en el aspecto diario de las lluvias, caracterizándolo por un valor máximo en las horas de la tarde. Por este motivo se caracteriza la precipitación individualmente en cada una de las cuencas hidrográficas en su forma natural y sin considerar la unión de los ríos, además por contar con datos históricos específicos de cada una de ellas.

En la cuenca hidrográfica del río Gascón la lluvia media hiperanual es de 990 mm siendo los meses más lluviosos mayo y octubre con 189 mm seguido de septiembre con 153 mm. En el período más lluvioso mayo – octubre, precipita el 70% de la lluvia anual, mientras que en el período menos lluvioso se registra el 30%. En el mes de Noviembre precipitan 105 mm, registrándose como media, más lluvia que en Julio y muy próximo a agosto, por lo que hace pensar a algunos especialistas que es un mes lluvioso por lo menos en el territorio. Se aprecia que la zona no posee una alta pluviosidad encontrándose por debajo de la media provincial (1248 mm).

El año más lluvioso fue 1981 con 2150 mm seguido de 1980 y 1974 con 1672 y 1656 mm. El año más seco resulto ser 1970 con 793 mm. Para determinar la precipitación media hiperanual se emplearon los datos de lluvia del equipo representativo de la zona y en el informe la distribución anual, mensual y a diferentes probabilidades, se empleó los 38 años datos del historial del equipo pluviométrico y por el Método Aritmético y por el mapa isoyético nacional se obtuvo una lluvia de 990 mm, el equipo 1486 Chalóns posee una serie homogénea, avalada por la simple y Test de Depuración, esta serie fue ajustada por varias leyes resultando en equilibrio estadístico (ver tabla 2.5).

Tabla 2.5. Parámetro de la serie. Fuente: (INRH, 2019).

Gascón	P_o (mm)	C_v	σ	ξX_o (%)	ξC_v (%)
	990	0.30	289	4	11.8

En la cuenca hidrográfica del río Guaos la lluvia media hiperanual es de 1010 mm siendo los meses más lluviosos mayo y septiembre con 164 mm y 132 mm seguido de octubre con 128,7 mm. En el período más lluvioso mayo – octubre, precipita el 68 % de la lluvia anual, mientras que en el período menos lluvioso se registra el 31 %. Se aprecia que la zona no posee una alta pluviosidad encontrándose por debajo de la media provincial (1348 mm) con un déficit de 338 mm.

El año más lluvioso fue 1981 con 1741 mm seguido de 1989 y 1993 con 1344 y 1296 mm. El año más seco resulto ser 1969 con 442 mm. Se emplearon los datos de lluvia del equipo representativo de la zona y en el informe la distribución anual, mensual y a diferentes probabilidades.

Para determinar la precipitación media anual de la cuenca, se empleó los 28 años datos del historial del equipo pluviométrico y por el Método Aritmético se obtuvo una lluvia de 1010 mm, el equipo 1118 Manantuaba posee una serie homogénea (ver tabla 2.6), se procedió a su análisis estadístico obteniéndose que la serie se encuentra en equilibrio después de ser ajustado por varias leyes.

Tabla 2.6. Parámetro de la serie. Fuente: (INRH, 2019).

Guaos	P_o (mm)	C_v	σ	ξX_o (%)	ξC_v (%)
	1010	0.3	279	5.2	13.0

Las distribuciones mensuales y a diferentes probabilidades se ofrecen a continuación:

Tabla 2.7. Distribución mensual de la lluvia a diferentes probabilidades. Fuente: (INRH, 2019)

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Po (mm)	39.5	42.4	55.5	52.2	163.8	96.4	79.0	88.5	131.7	128.7	91.8	29.9	1010
50 %	38.4	41.3	54	50.7	159.4	93.8	76.8	86.1	128.2	125.3	89.4	29.1	983
75 %	31.5	33.9	44.4	41.7	130.9	77.0	63.1	70.7	105.2	102.8	73.4	23.9	807
85 %	28.1	30.2	39.5	37.1	116.6	68.6	56.2	63.0	93.7	91.6	65.4	21.3	719
95 %	23.3	25.1	32.8	30.8	96.8	57.0	46.7	52.3	77.8	76.1	54.3	17.7	597

En la cuenca del río Yarayó no hay equipos pluviométricos por lo que la caracterización de la precipitación en esta cuenca hidrográfica será por datos y estudios hechos con anterioridad, realizados por el Instituto de Meteorología (INSMET) y los datos que brinda el mapa isoyético nacional; datos que fueron obtenidos a través de la herramientas del SIG. Aplicando uno de los métodos de interpolación (basados en métodos estadísticos conocidos) para obtener los valores puntuales de precipitación media hiperanual dicta que la lluvia tiene como valor promedio histórico unos 1000 mm, este puede variar según el período en el que se estén produciendo (período seco y período húmedo).

Como gran parte del municipio Santiago de Cuba y del territorio provincial la precipitación en esta cuenca es variada durante todo el año, cuenta con un período

de sequía desde enero hasta abril, con precipitaciones intensas durante mayo y junio y luego otro período seco desde junio hasta agosto y un período de lluvias abundantes de septiembre hasta diciembre según las principales características hidrológicas de la región. La temporada más mojada dura entre el 5 de mayo al 6 de noviembre, con una probabilidad mayor a 13%. Y la probabilidad máxima de un día es del 22% el 10 de octubre (ver figura 2.8).

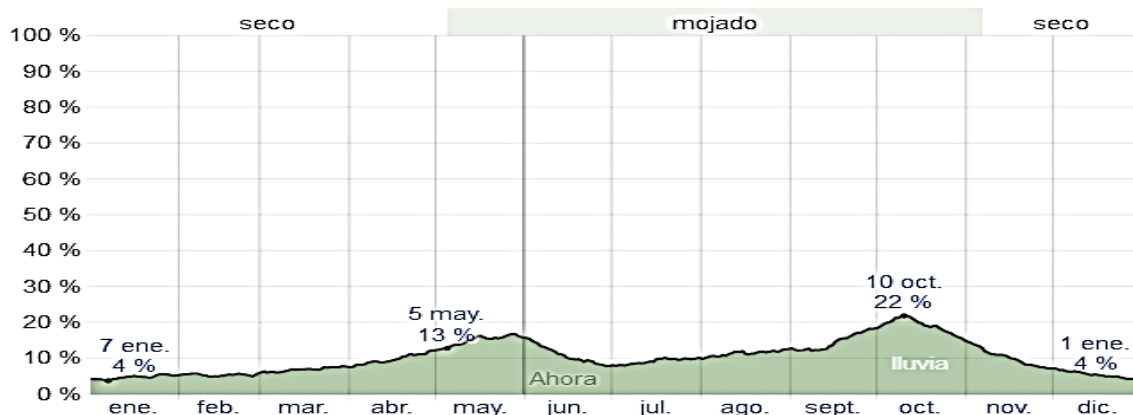


Figura 2.8. Probabilidad diaria de la precipitación. Fuente: INSMET, (2018)

Humedad Relativa (%)

La humedad relativa, debe su comportamiento a las características específicas del territorio, al régimen de precipitaciones, así como a la influencia marítima y también relativa dependen necesariamente de los valores de temperatura, por lo cual se puede decir que esta variable climática es alta durante todo el año fundamentalmente en el período lluvioso. El proceso de cálculo del indicador parte de la disponibilidad de datos oficiales de humedad relativa reportada para las estaciones de monitoreo que conforman la red meteorológica de los países.

El procedimiento implica la selección de la estación o estaciones que resulten representativas de la ciudad para la cual se calculará el indicador. Se recomienda emplear datos de estaciones que: 1) resulten confiables, 2) dispongan de datos históricos que permitan análisis de series de tiempo, y 3) garanticen su permanencia en el tiempo.

En el caso de esta investigación por contarse solamente con datos históricos de forma generalizada en la provincia Santiago de Cuba, aportados por la única

estación meteorológica existente en la zona de estudio, evidencia que la humedad relativa presenta valores regulares que van desde 78% de humedad hasta 83,2%, en los meses lluviosos es de 78,7% y 80,2%, condicionando su aumento las precipitaciones que ocurren en el período, por similar razón en los meses de invierno la humedad relativa es menor, coincidiendo con Viera (2009) quien plantea que la humedad relativa es mayor en los meses de verano y la menor en los meses de invierno. Para el período estudiado (2014-2018) se registraron valores promedios anuales que oscilaron entre 67 y 73%, y por meses entre 67 y 80% (Montoya, 2012). En la (tabla 2.8) se aprecia el comportamiento de esta variable en el período de análisis antes señalado.

Tabla 2.8. Distribución mensual de la humedad relativa % en el período (2014-2018).Fuente: Instituto de Meteorología, (INSMET)

Años	2014	2015	2016	2017	2018
Enero	69	69	64	74	66
Febrero	71	70	66	70	66
Marzo	62	67	62	68	66
Abril	67	69	68	68	72
Mayo	67	69	67	72	73
Junio	70	70	68	71	70
Julio	70	68	65	70	72
Agosto	71	70	70	71	67
Septiembre	73	71	70	69	75
Octubre	74	71	75	73	75
Noviembre	74	70	71	67	78
Diciembre	68	67	69	68	73
PROM.	69,67	69,25	67,92	70,08	71,08

El período más húmedo del año dura 9,0 meses, del 25 de marzo al 25 de diciembre. El día más húmedo del año es el 27 de agosto, con humedad el 98 % del tiempo. El día menos húmedo del año es el 27 de febrero, con condiciones húmedas el 60 % del tiempo.

Puede declararse que en los últimos 5 años (2014-2018) la tendencia de la variabilidad climática en las variables temperatura media, máxima media, mínima media es aumentar, en el caso de la humedad relativa es a la disminución, ratificando que existe una variación. En los últimos años se ha observado que

algunos eventos climáticos extremos han incrementado su variabilidad y sus impactos se hacen cada vez más notables. Esto se nota principalmente en la precipitación, las anomalías de las alturas geopotenciales de las superficies de presión en la tropósfera, por sí mismas, poseen una importante implicación en el comportamiento de las lluvias, entre otros componentes que deben ser tenidos en consideración. Es común encontrar regiones sin registros o con escasa información, por lo que se debe recurrir a criterios de evaluación regional. La hipótesis de la regionalización es que las lluvias importantes se presentaron en sitios próximos, lo cual genera la ventaja de aprovechar los datos de las estaciones, donde sí se registraron aquellos eventos.

Es necesario en el estudio de los diferentes modos de variación hidroclimática; la evaluación de sus efectos. Esto puede ser una herramienta útil en la adecuada identificación de estrategias de adaptación más eficientes. El desarrollo de nuevas investigaciones relacionadas con los impactos de la variabilidad del clima en los recursos hídricos o la agricultura, por citar solo dos casos, permitiría la creación de sistemas de aviso, para reducir las pérdidas o aprovechar las oportunidades.

Capítulo 3

CAPÍTULO 3. MODELACIÓN ESPACIAL DE LAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realizará el análisis del comportamiento y la modelación espacial de las variables hidroclimáticas a partir de los distintos valores y datos obtenidos en el área de estudio.

Se estima que el incremento de la temperatura en el oriente del país puede ser tan importante, que aún en los casos donde haya ocurrido un aumento de las precipitaciones, podría ocurrir una intensificación y expansión de los procesos de aridez y sequía como consecuencia del incremento de las variables en estudio (Centella *et al.*, 2000). Para la determinación del escurrimiento superficial es necesario tener diferentes datos y modelos espaciales que permitan una mejor caracterización de las cuencas hidrográficas a representar.

3.1. Modelación de elementos básicos para el cálculo del escurrimiento superficial en las cuencas hidrográficas Guaos-Gascón y Yarayó

La caracterización hidrológica de las cuencas a tratar resulta compleja, principalmente por las siguientes causas: registros climáticos y de aforo escasos y con series incompletas; variabilidad topográfica; diversidad de unidades ambientales; inaccesibilidad.

Cada cuenca presenta características únicas que la identifican y diferencian de su entorno. Sin embargo, los procesos hidroclimáticos que en ellas se desarrollan son similares: precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento. En este contexto, la predicción y el modelado digital representan una alternativa interesante para la generación de información hidrológica de variables dinámicas como las precipitaciones, los caudales y la pérdida de suelos.

A continuación se muestran modelos más generalizados de las cuencas hidrográficas, estos permitirán un mejor uso y modelación del escurrimiento y de otras variables espaciales que puedan ser utilizadas para identificar y caracterizar la variabilidad hidroclimática en un transcurso espacio-temporal.

En el modelo digital (ver Figura 3.1) se muestra diversos aspectos físicos naturales: la composición litológica o mineral, la aridez o basicidad de los suelos, los arroyos,

los bosques, yacimientos, canalizaciones, zonas bajas y también variables sociales: número de habitantes, densidad de población, objetivos económicos, viales, construcciones, pozos, puentes, etc., se pueden analizar como una superficie en estas cuencas, estos aspectos están bien detallados en los modelos expuesto.

Esto permite tener un detallado manejo de las cuencas; el área de puntos poblados en la cuenca Guaos-Gascón supera las 50000 casas habitables con un número mayor de 25000 personas, algunos arroyos son permanentes e intermitentes que deben su aparición al régimen de lluvia existente en la cuenca, la vegetación es variada; la maleza compacta sin espina y las hierbas se extienden por toda la cuenca hidrográfica identificándose como bosques con vegetación foliáceas, existen 9 puentes, los viales son diversos y están identificados entre carreteras, terraplenes mejorados y calles.

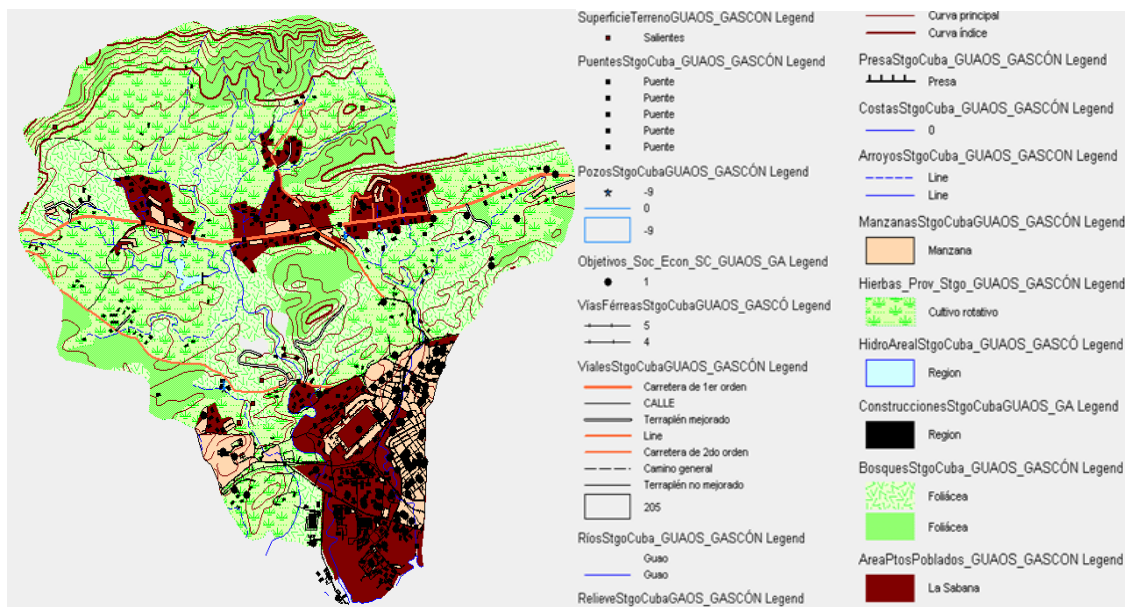


Figura 3.1.Cuenca hidrográfica Guaos-Gascón. Fuente: Elaborada por el autor.

En el caso de la cuenca hidrográfica del río Yarayó (ver figura 3.2) su composición física está principalmente enclavada en el territorio de la cabecera provincial de Santiago de Cuba, superando las 12000 casas resididas con un número de habitantes mayor a los 30000 personas, también cuenta con arroyos intermitentes y permanentes aumentando su caudal en la temporada lluviosa, y desapareciendo en

la estación seca; a partir de su aparición afectan considerablemente las zonas bajas de la cuenca, provocando inundaciones y otros fenómenos hidrológicos que dañan las viviendas e interrumpen el acceso de calles y avenidas importantes, la vegetación presente en la zona varía entre hierbas y malezas compactas sin espina caracterizadas por su gran proliferación en la franja norte de la cuenca, preexisten 2 puentes de hormigón con más de 5 metros de longitud y una línea férrea que forma parte de la estación ferroviaria "General de División Senén Casas Regueiro" y la red de viales se compone entre calles, avenidas, callejuelas y callejones.

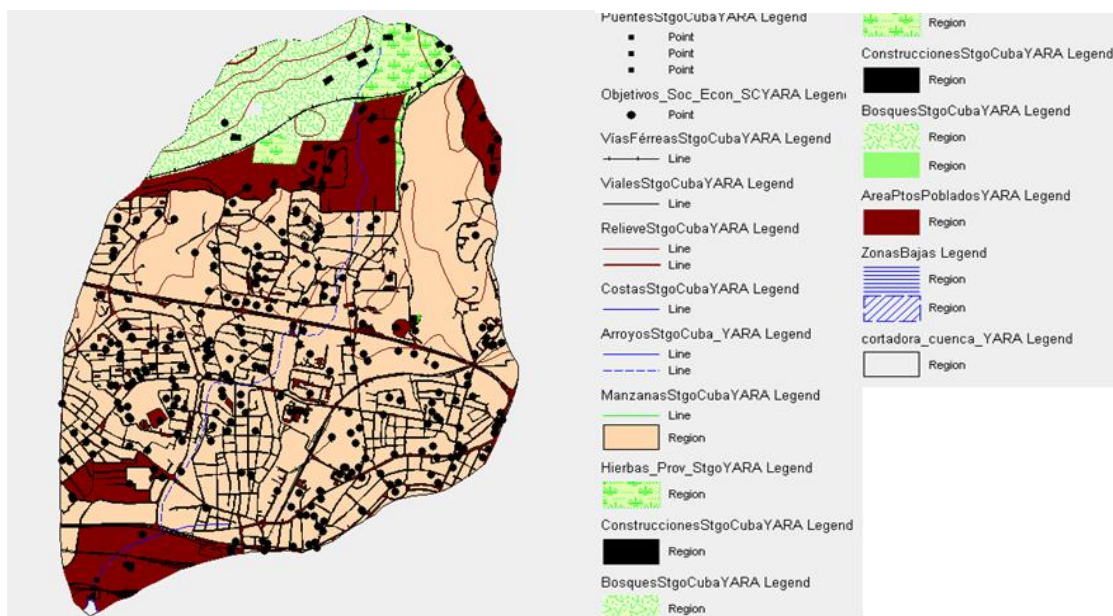


Figura 3.2. Cuenca hidrográfica Yarayó. Fuente: Elaborada por el autor.

Estas características permiten conocer y evaluar el coeficiente de escurrimiento, en este caso varía por el tipo y uso del suelo, características que fueron detalladas en el capítulo 2 y en los datos anteriores obtenidos de los modelos digitales.

El ejemplo más típico de variable regionalizada es la elevación sobre el nivel del mar, representada mediante los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Se trata de una superficie que representa la topografía del terreno, es decir, las alturas en cada punto de un territorio. Las características del suelo y del relieve de las cuencas hidrográficas Guaos-Gascón y Yarayó expuestas en el capítulo 2 se muestran utilizando un SIG a escala 1:25000 (ver figuras 3.3, 3.4 y 3.5).

El relieve de la cuencas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó es básicamente de alturas y montañas, y los ríos tributan sus aguas a Bahía de Santiago de Cuba (largo: 8,5 Km; ancho: 2,4 Km; profundidad: entre 8,8 y 13,7 m), uno de los accidentes geográficos más significativos de la provincia santiaguera. Tienen una altura máxima entre 100-500 metros destacándose la cuenca de los Guaos-Gascón con una altura máxima de 545 metros según los modelos digitales realizados, con un relieve abrupto hacia la montaña y más suave hacia la desembocadura.

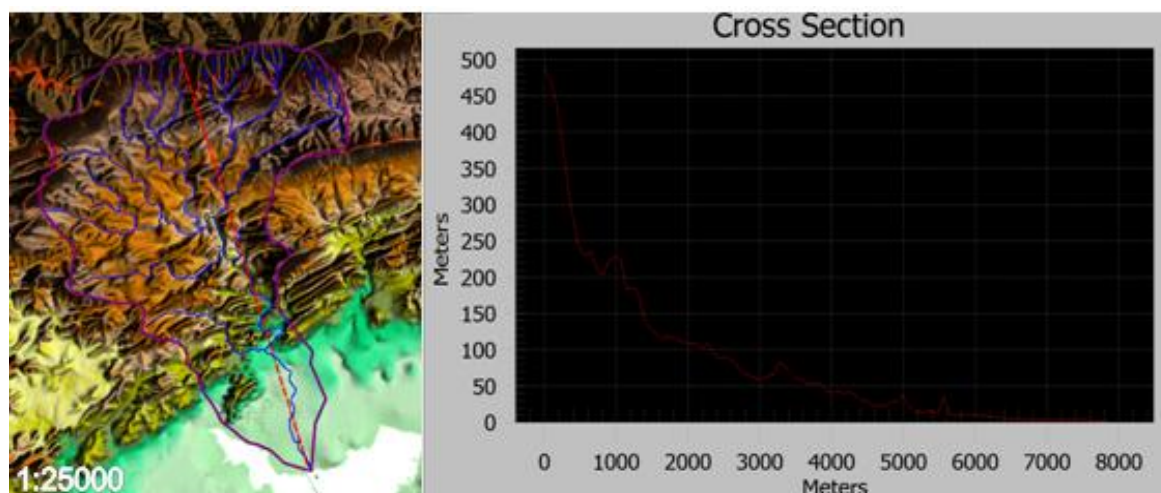


Figura 3.3.Modelo digital de elevación (MDE) mostrando la delimitación de un perfil de la cuenca hidrográfica del río Guaos.

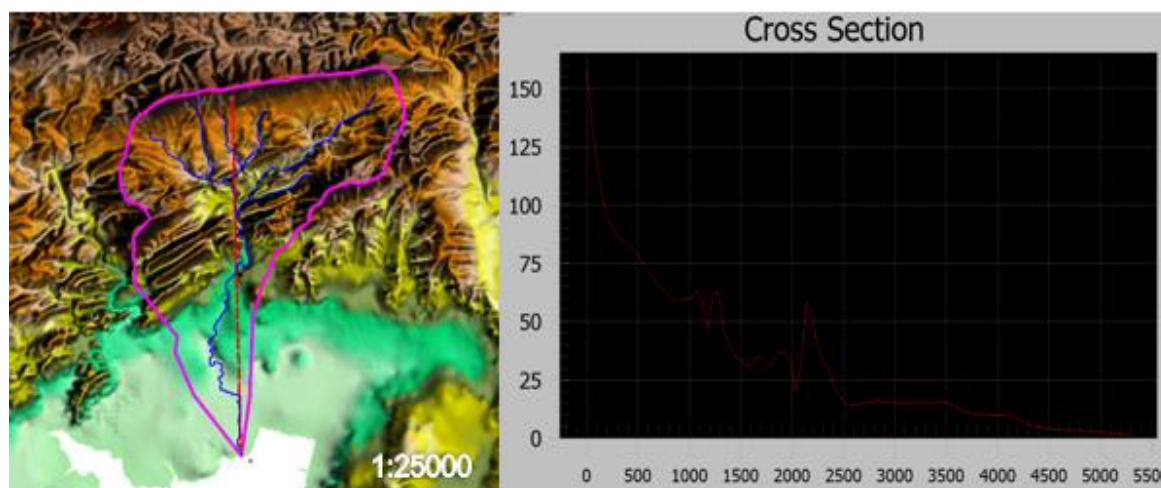


Figura 3.4.Modelo digital de elevación (MDE) mostrando la delimitación de un perfil de la cuenca hidrográfica del río Gascón.

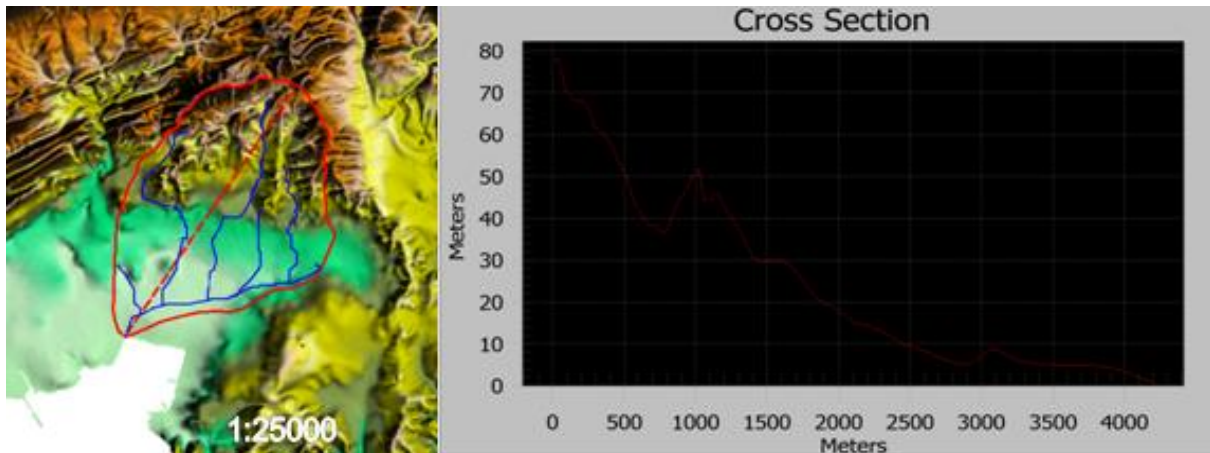


Figura 3.5. Modelo digital de elevación (MDE) mostrando la delimitación de un perfil de la cuenca hidrográfica del río Yarayó.

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. Su estimación es sencilla a partir del MDE, aunque existen diferentes procedimientos que dan lugar a diferentes resultados (cuando se trabaja con un programa es importante conocer cuál es el algoritmo que utiliza para calcular pendientes) (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1. Pendientes medias determinadas con la ayuda de un SIG en las cuencas hidrográfica de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó. Elaboración propia.

Cuencas	Pendientes (Máx)	Pendiente(Min)	Pendiente(Media)
Guaos-Gascón	112	0,50	35,6
Yarayó	54,9059	0,33	23,29

Como se necesita información de los parámetros hidrológicos a nivel de detalle de muchas de estas cuencas, para sitios específicos o para la totalidad de un territorio, el cálculo y la aplicación tradicional de las fórmulas resulta muy complejo. El trabajo con capas temáticas con SIG permite resolver este problema.

3.2. Modelos hidroclimáticos

En la confección de los modelos hidroclimáticos se ensayaron diferentes métodos:

- Interpolación de datos de estaciones climatológicas: Sistema utilizado usualmente para la generación de mapas climáticos (Carballeira *et al.*, 1987; Mármol, 1999; García Bes, 1999).

- Obtención de modelos de precipitación, escurrimiento, relieve, a partir del análisis y correlación con datos específicos y generales, obtenidos a partir de monografías anteriores.
- Estudio de correlación de las variables hidroclimáticas entre sí y con variables topográficas, de ubicación y cobertura del suelo.

Si bien la variable temperatura no está directamente relacionada con los procesos hidrológicos, aquélla es incorporada en el modelado por su influencia en la variabilidad hidroclimática y su posible interrelación con otras variables como la precipitación.

En estas cuencas es muy común que durante la temporada lluviosa ocurran aguaceros intensos diarios de corta duración, acompañados de fuertes vientos debido al afecto orográfico inducido por la topografía y la lluvia es variada temporalmente y espacialmente. La distribución de la precipitación marca una gran diferencia entre las zonas costeras y las zonas altas. Por la poca información y por los pocos equipos de medición que se encuentran en el área se decidió calcular la precipitación media hiperanual utilizando las herramientas del SIG, obteniendo modelos digitales de las precipitaciones en las cuencas en estudio (ver figura 3.6).

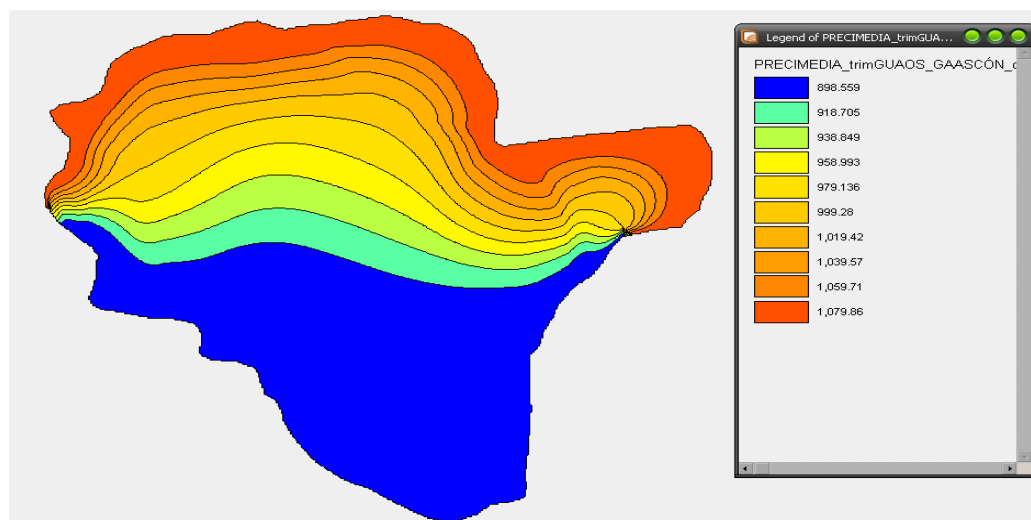


Figura 3.6.Modelo de la precipitación para la cuenca de los ríos Guaos-Gascón obtenido con un SIG. El clima es tropical húmedo, como en el resto de las cuencas hidrográficas de la isla. Las precipitaciones aumentan a medida que se asciende a las montañas y disminuyen hacia el sur. Lo complejo de la orografía en el territorio influye

notablemente sobre los procesos causales de la cantidad de precipitaciones (ver figura 3.7).

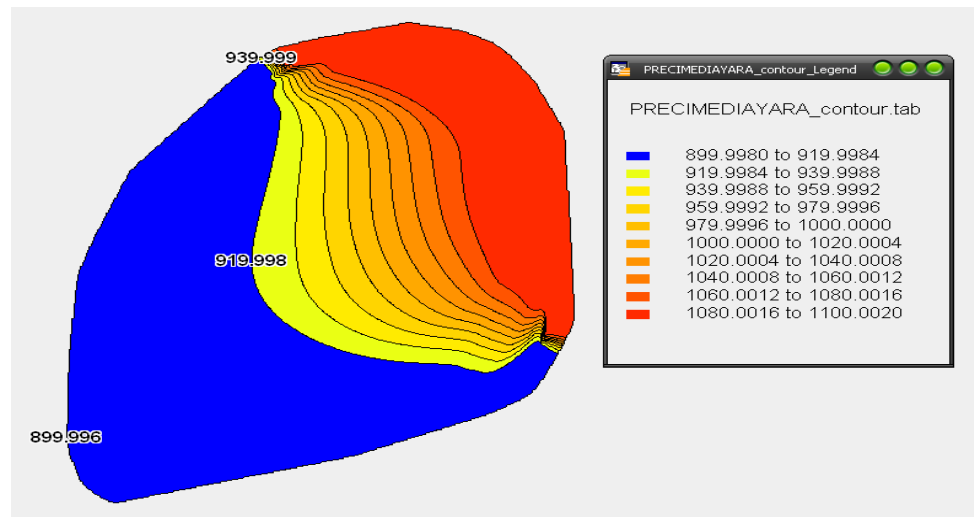


Figura 3.7. Modelo de la precipitación para la cuenca de los ríos Yarayó obtenido con un SIG.

En el área de estudio fueron identificados próximos a las cuencas escogidas 7 estaciones pluviométricas (ver figura 3.8), en la cuenca del río Yarayó no existen estaciones pluviométricas; por lo que la determinación de la precipitación, se tuvo en cuenta la información de las estaciones pluviométricas y la elaboración del mapa isoyético provincial y nacional, utilizando las herramientas que brinda los SIG (ver figura 3.9):

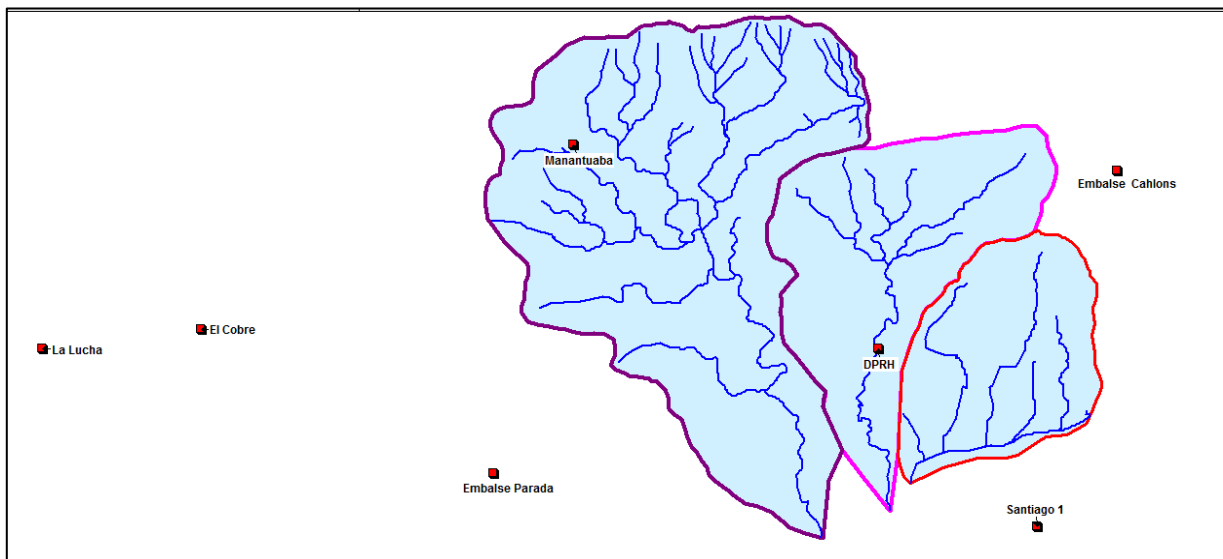


Figura 3.8. Ubicación de las Estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio.

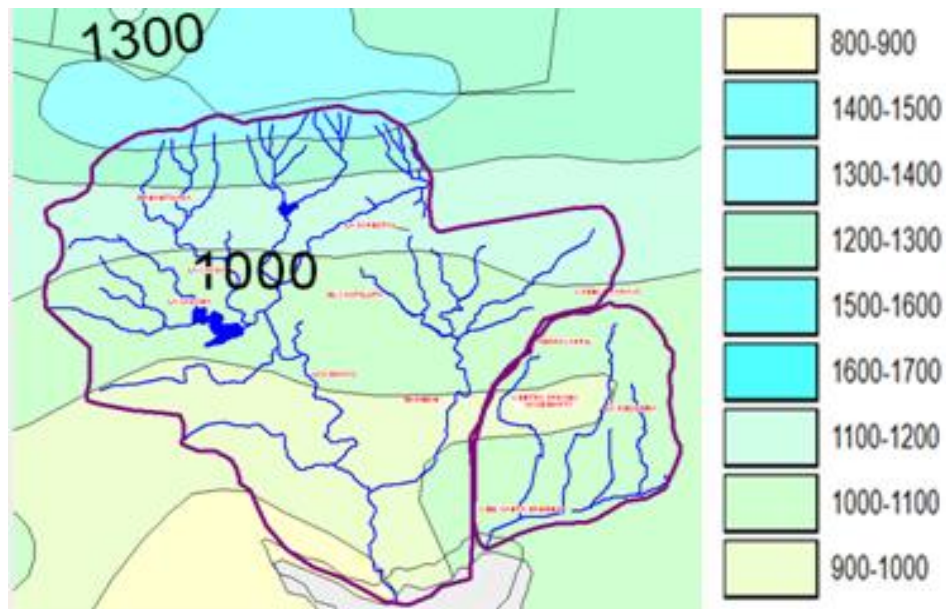


Figura 3.9. Mapa isoyético de la cuenca de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó, obtenido del mapa nacional.

Aunque existen cartografías publicadas de precipitación determinados por los mapas isoyéticos, se trata de una variable con una variabilidad temporal tan alta que los mapas quedan rápidamente obsoletos, quizás incluso antes de su publicación. La solución al problema vendría facilitada en la utilización de estos modelos digitales dada su cómodo manejo y actualización.

3.3. Selección del método para determinar el potencial del escurrimiento superficial

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 de las fórmulas clásicas explicado en la metodología de trabajo anteriormente.

1. El escurrimiento superficial y los caudales medios de la cuenca hidrográfica de Guaos-Gascón fluctúan entre (0.99 - 17,99 Hm³) y (0,0316m³/s y 0,65m³/s) respectivamente.

2. El escurrimiento superficial y los caudales medios de la cuenca hidrográfica del río Yarayó se encuentran entre $(0.99 - 5.52 \text{ Hm}^3)$ y $(0,0316\text{m}^3/\text{s}$ y $0,5\text{m}^3/\text{s})$ respectivamente.

El escurrimiento con frecuencia se expresa como altura de lámina de agua y en el caso de terrenos inundables constituye la cantidad de agua que se requiere sacar del área de drenaje en un período de tiempo determinado, esto ocurre con frecuencia en los poblados que se encuentran en las cuencas en cuestión. En estas las lluvias son intensas y de corta duración, que en muchos casos superan la capacidad de infiltración del suelo, provocando que el agua corra superficialmente o se encharque.

Si bien el escurrimiento es necesario para mantener el caudal de ríos, arroyos y sus afluentes, su exceso puede ser perjudicial por la erosión. La modelación espacial distribuida de lluvia-escurrimiento-caudal, el uso de información obtenida de los modelos digitales de estas variables hidroclimáticas ofrece una alternativa para estudios hidrológicos y gestión de recursos hídricos en las cuencas hidrológicas.

Este proceso de escurrimiento superficial, sin control, constituye un problema ambiental crítico, favorece la erosión hídrica del suelo, aumentando el caudal, la carga de sedimentos y de otros contaminantes en el agua, favoreciendo a la variabilidad hidroclimática en las cuencas hidrográficas.

Conclusiones

CONCLUSIONES

3. El análisis de la bibliografía consultada permitió definir y caracterizar las variables hidroclimáticas que intervienen de forma espacial en las cuencas hidrográficas, la metodología de estudio con la selección de los métodos y las herramientas necesarias para el estudio.
4. Se determinó el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas: temperatura, humedad relativa, precipitación y escurrimiento, a través de los SIG, en la cuenca de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó.
5. Se confeccionaron los modelos digitales del relieve, de precipitación y del escurrimiento; los cuales permitieron caracterizar el comportamiento espacial de estas variables en la zona.
6. La temperatura mínima en las cuencas hidrográficas estudiadas oscilan entre (20,4 - 20,5 °C respectivamente) y las máximas medias durante (julio-agosto con 33,9 - 34,0 °C). Los valores de precipitación media hiperanual varían espacialmente en todo lo largo de las dos cuencas hidrográficas (989 -1100 mm). Para el período estudiado (2014-2018) se registraron valores promedios anuales de humedad relativa que oscilaron entre 67 y 73%, y por meses entre 67 y 80%. El escurrimiento superficial y los caudales medios fluctúan entre (0.99 - 17,99 Hm³) y (0,0316m³/s y 0,65m³/s) respectivamente.
7. Las variables hidroclimáticas analizadas (temperatura media y humedad relativa media) muestran una tendencia al aumento en el último decenio, a excepción de las precipitaciones que presentan una ligera tendencia a la disminución.
8. En las cuencas de los ríos Guaos-Gascón y Yarayó se evidencia que son vulnerables ante los impactos de la variabilidad hidroclimática, entre estos: al incremento de la temperatura media, lo que trae genera climas cálidos y extremos, con sequías prolongadas y mayor amenaza a los eventos de desertificación. Esto conlleva al deterioro de los recursos naturales, afectando el desarrollo socio-económico y medioambiental de las cuencas estudiadas.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

- Instalar nuevas estaciones pluviométricas en la zona de estudio, principalmente en la cuenca hidrográfica Yarayó, la cual no tiene ninguna.
- Desarrollar nuevas investigaciones para evaluar el impacto de la variabilidad natural del clima y poder comprender mejor los impactos del cambio climático sobre la vida natural, social y económica del país.
- Monitorear cada cierto período de tiempo estas variables y actualizar los modelos espaciales, para tener un mayor control de las mismas.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro Aguilar, C., 2004. Estudio de Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas. La Habana. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Boletín Ciencia y Tecnología No. 24.
2. CENHICA., 2001. Regionalización Hidrológica y del Balance Hídrico para las Condiciones de Cuba (inédito). La Habana, Cuba.
3. CITMA (CU). 1997. Ley del Medio Ambiente. Descripción política ambiental. La Habana; Cuba.
4. Cuevas, R. D., Benamor, O., 2009. Aplicación del Índice de calidad del agua superficial y subterránea para la evaluación sistemática de los recursos hídricos. (INRH, Ed.). pp 1-10. Cuba.
5. Dourojeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G., 2002. Gestión del Agua a Nivel de Cuencas: Teoría y Práctica. Santiago de Chile, Chile. CEPAL. V CONVENCIÓN CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA, GEOCIENCIAS, 2013.
6. La Habana, 1 al 5 de abril de 2013. ISSN 2307; 499XX CONGRESO CUBANO DE GEOLOGÍA (GEOLOGIA´2013) Hidrogeología e Ingeniería Geológica, GEO5-O3.
7. García Fernández, Jorge Mario.2007. La aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada del recurso hídrico: Aproximación al caso cubano. La Habana, Cuba.
8. GEARH, 2002. Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. – INRH.
9. González Piedra, J. I., 2006. Estudios ambientales en cuencas. El manejo de cuencas en cuba: actualidades y retos. Primera parte. [http://www. JIG Piedra - ine.gob.mx](http://www.jig-piedra-ine.gob.mx): 10 Febrero 2011.
10. Rodríguez Lugo, D. M. *et al.*, 2011. Aplicación de la gestión integrada de los recursos Hídricos en la cuenca hidrográfica Ariguanabo. Trabajo presentado en la VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, del V Congreso de Gestión Ambiental, realizado en La Habana Cuba del 4 al 8 de julio de 2008.

11. Sánchez, J. D. et al., 2002. Diagnóstico Ambiental de la cuenca hidrográfica Cochino-Bermejo. Empresa de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería de Matanzas, Cuba.
12. UNESCO. (2006). Curso Regional Itinerante en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos con énfasis en ecohidrología. La Habana, Cuba, 23, 24 y 25 de noviembre de 2006.
13. Huang N.E, Wu Z. (2008). A Review on Hilbert-Huang Transform: Method and its applications to geophysical studies. Rev. Geophys. 46. RG2006.doi:10.1029/2007/RG000228
14. Huffman, G. F., D. T. Bolvin, E. J. Nelkin y D. B. Wolff (2007). "Satellitebased estimation of precipitation using microwave sensors". *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson, Ed. JhonWiley and Sons, 965-980.
15. Teresa Ayllón Torres y Jesús Gutiérrez Roa. Introducción a la OBSERVACION METEOROLOGICA. Editorial Limusa, México, 1983.
16. José M. Lorente. Meteorología. Editorial Labor, S. A. Barcelona, Madrid, Buenos Aires, Río de Janeiro, México, Montevideo, 1966.
17. T. 1987. "Boundary Layer Climates". Routledge Rutllant, J. 2004. "Apuntes Curso de Introducción a la Meteorología y Oceanografía, GF45A.". Facultad de Ciencias Físicas y Matemática, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
18. Caro, C. (2012). Creando Conciencia Ambiental. Estudio de la Atmósfera [diapositivas de Power Point]. Lima (Consultado el 26 de febrero de 2014).
19. Jiménez, Francisco: Introducción al manejo de cuencas hidrográficas I. CATIE. Costa Rica, año 2007. Jiménez, Francisco: *Recursos, ciencia y decisión: Gestión integral de cuencas hidrográficas*. Edición No. 2. CATIE. Enero 2005. ISSN 1659 - 1224.
20. Durand, M, T. Evaluación del Potencial Hídrico de la Provincia Santiago de Cuba. ISBN 978-959-247-156-6. Marzo, 2017.
21. Ibáñez Sara., et al., 2011. *Morfología de las cuencas hidrográficas*.
22. Domínguez, E., 2015. Ciclos seculares en variables hidroclimatológicas, p.14.

23. Guerra, A. M.; Prieto, G. 1989 "Descripción geológica de redes fluviales". Material presente en la Empresa de Recursos Hidráulicos de Santiago de Cuba.
24. Bolaños, J. 2004 "Estudio de la vulnerabilidad del río Los Guaos y su poder auto depurativo". Segundo Seminario Internacional del Agua. Santiago de Cuba, 2004.
25. CITMA. Estrategia Ambiental de Santiago de Cuba (2007-2010). Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Delegación Provincial, Santiago de Cuba, 2008.
26. Islanes, M. 2008. Curso Gestión de Cuencas II. Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Documento de enseñanza de 280 páginas. Gestión Académica 2008. Universidad Mayor Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca— Centro de Estudios de Postgrado e Investigación CEPI. Sucre - Bolivia, Mayo 2008.
27. Dip. Gandarilla, Ariamna, 2012. Evaluación de la calidad de las aguas del río Los Guaos de la provincia Santiago de Cuba. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, 2011 García Fernández, Dr. Jorge Mario, Los órganos de Cuenca y la gestión integrada del agua. Voluntad hidráulica No. 105, pp.8-13, 2012.
28. Sánchez, C. I; Inzunza, I. M. A.; Catalán, V. E. A.; González, B. J. L.; González, C. G. y Velásquez, V. M. 2012. Variabilidad climática y productividad agrícola en zonas con errático régimen pluvial.
29. Centella, A., L. Naranjo y L. Paz Castro (1997): Variaciones y cambios del clima en Cuba. Instituto de Meteorología. 57 pp.
30. Centro Meteorológico Provincial de Santiago de Cuba (2016). López Deulofeu, Teresa., "Compendio de Meteorología y Climatología". La Habana, 1982.
31. Aparicio, F.: Fundamentos de Hidrología de Superficie, 303pp., Ed. Limusa, Balderas, México, 1997.
32. *Hidrología para Ingenieros*. 2ª Ed. Editorial Mc Graw-Hill Latinoamericana, D. F. México. 386 p.
33. Murillo Illanes, M, 2007. Determinación de la Escorrentía a Partir de la Precipitación sobre una Cuenca. Monografía. Universidad de Extremadura,

Facultad de Filosofía y Letras, Departamento de Geografía y Ordenamiento del Territorio.

34. Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2008). Climate change and economic growth: Evidence from the last half century. National Bureau of Economic Research.
35. Koutsoyiannis, D., 2003. Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), pp.3–24.
36. Bosque Sendra, J., 1992. *Sistemas de Información Geográfica*, Ed. Rialp. 451 pp.
37. Batista M., J. 1983. *Escurrimiento superficial*. Corporación de Desarrollo del Valle de San Francisco (CODEVASF). Brasilia, Brasil.
38. Paz, L. (2009). *El Cambio Climático y sus Consecuencias para Cuba*. Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba.
39. Lic. Martínez Mustelier, Mirna. 2018: Tesis en opción al título académico de Máster en Manejo Integrado de Zona Costera; Impacto de la variabilidad climática en asuntos clave del Manejo integrado de Zonas Costeras en la zona costera de Baconao. Santiago de Cuba. Cuba
40. Moreno (2012): "Modelización espacial de precipitaciones extremas".
41. Revista voluntad hidráulica. *Voluntad Hidráulica No.105, 2012. Santiago de Cuba*

Sitios de internet:

- <https://www.fluencecorp.com/es/que-son-las-precipitaciones-pluviales/>(consultada el 15 de febrero).
- <http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/precipcla.htm>(consultada el 18 de febrero).
- <http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/precipcla.htm>(consultada el 22 de febrero).
- <https://es.slideshare.net/NatashaMartin10/hidrologia-calculo-de-precipitacion/>(consultada el 25 de febrero).

- <http://www.fdtavalles.org/pdfs/fdta/Escurrimiento%20Superficial.pdf> (consultada el 10 de marzo).
- <https://www.fiscalab.com/apartado/temperatura#contenidos> (consultada el 14 de marzo).
- <https://geofrik.com/2014/02/06/temperatura-atmosferica> (consultada el 16 de marzo).
- <http://www.yachtpaint.com/esp/diy/ask-the-experts/qu%C3%A9-es-la-humedad-relativa.aspx> (consultada el 20 de marzo).
- <https://langerubén.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> (consultada el 23 de marzo).
- <http://www.ciclohidrologico.com/precipitacion> (consultada 10 de abril).

Anexos

ANEXOS

Anexo1: Instrumento Meteorológico denominado higrómetro, que se instala en la caseta meteorológica.



Fuente: Martínez, (2018)

Anexo2: Instrumentos Meteorológicos utilizados para medir variables hidroclimáticas y los denominados pluviógrafo y pluviómetro que sirve para medir la cantidad de lluvia caída.



Fuente: Martínez, (2018)