2019

ESTUDIO DE LAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO EL COBRE TRIBUTARIA A LA BAHÍA DE SANTIAGO DE CUBA

YOSVANI JAY FUENTES

FCO

1-6-2019

Tesis de Grado

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
DEPARTAMENTO INGENIERÍA HIDRÁULICA

Tesis de Grado en Opción al Título de Ingeniero Hidráulico

Estudio de las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.

Autor: Yosvani Jay Fuentes

Tutores: Dra. C. Mayelin González Trujillo
Dr. C. Rogelio García Tejera

Santiago de Cuba, junio 2019
Año 61 de la Revolución

PENSAMIENTO

Estudio de las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con mucho cariño respeto, admiración y amor a:

Mis padres Ernesto Jay y Esquiurde Fuentes por ser la razón de mi existencia.

Mis hermanos Ernesto, Jorge Luis, Argenis y Lizbeth.

Mis queridas abuelas

Mis tíos y tías.

AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a:

Mis padres quienes han sido el motor impulsor de toda mi carrera, que de no ser por ellos nada de lo que he logrado hasta hoy hubiera sido posible, a ustedes, gracias y los quiero mucho.

Mis tutores quienes han tenido la paciencia y dedicación para el desarrollo de la presente tesis, y porque no, a todos los profesores que respeto y admiro de la facultad, quienes han aportado su granito de arena durante todo este periodo, que de una forma u otra, siempre supieron inculcarme buenos valores para el presente y el futuro.

Mis queridas abuelas, mis tíos, mis primos, quienes siempre dieron el paso al frente, para que esto fuese posible.

Mis compañeros, amigos, colegas y hermanos de la universidad que me brindaron todo su apoyo desde el comienzo sin importar ni pedir nada a cambio, personas con las que compartí 5 años de mi vida, dando siempre lo mejor de cada uno;

A todos ustedes

GRACIAS ETERNAMENTE.

Estudio de las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.

RESUMEN

RESUMEN

El estudio en cuencas hidrográficas es de vital importancia en el mundo debido a su influencia en las áreas de desarrollo local. La presente tesis tiene como objetivo caracterizar el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la bahía de Santiago de Cuba. El estudio basado en el análisis climático e hidrológico conllevó al cumplimiento de los objetivos planteados; el cálculo de la precipitación media anual se obtuvo a través del método de la media aritmética, determinando así el valor de la precipitación; los valores máximos se presentan al sur de la cuenca, mientras que los mínimos hacia el extremo nororiental de la zona de estudio. Para el cálculo del escurrimiento medio hiperanual se utilizó la formula empírica comendada por el Ing. J. L. Batista: Segunda variante (1982) puesto que este relaciona el escurrimiento medio anual con las lluvias anuales para las provincias Orientales. Los datos obtenidos de la temperatura media y la humedad relativa, en la institución encargada de medir estas variables climáticas no ofrecieron datos suficientes para un amplio estudio, pero se pudo reflejar la variabilidad de las mismas para un período estimado de 5 años. Finalmente se llevó a cabo la modelación de las variables relieve, tipo de vegetación y suelo y dentro de la hidroclimática precipitación, que permitieron analizar e identificar las relaciones entre los elementos geográficos para la toma de decisiones.

SUMARY

SUMMARY

The study at drainage areas is of vital importance in the world due to his influence in the local development areas. In present it thesis some climatic characteristics at the river's drainage area determine the Copper themselves tributary to James's bay of Cuba. The study based in the climatic analysis and hydrologic bore the fulfillment of the presented objectives; The calculation of precipitation got annual mean from the arithmetical mean itself through the method, determining the value of precipitation that way; The peaks present itself south of the basin, in the meantime than the minimums toward the north extreme of the survey area. J utilized the empirical formula recommended by the Ing. Itself for the calculation of the half hyper-yearly dripping. l. Fine cambric: You second variant (1982) since this relates the half yearly dripping with the yearly rains for the Oriental provinces. The data obtained of the half a temperature and the relative humidity at the institution entrusted with measuring these climatic variables they failed to match for an ample study, but the variability of the same for a period estimated of 5 years could be reflected. Finally, the modelation of the variable relief, type of vegetation and floor and inside the climatic variables took effect precipitation for the sake of examining and identifying the relations between the geographic elements for the overtaking.

ÍNDICE

Introducción 1
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO- CONCEPTUAL 7
1.1 Introducción 7
1.2 Cuenca 7
1.2.1 Cuenca hidrográfica 7
1.2.2 Importancia de la cuenca hidrográficas 10
1.3 Precipitación 10
1.3.1 Formación de la precipitación 11
1.6.1 Factores que afectan el escurrimiento 21
1.6.2 Instrumentos de medición del escurrimiento superficial 22
1.6.3 Métodos para la estimación del escurrimiento superficial 22
1.7 Software para la realización de los modelos espaciales 25
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS 29
2.1 Introducción 29
2.2 Caracterización del área o zona de estudio 29
2.2.1 Geología 30
2.2.2 Geomorfología 30
2.2.3 Relieve 31
2.2.3 Características climáticas generales 31
2.2.4 Suelos y sus procesos de erosión 32
2.2.5 Flora y vegetación 32
2.2.6 Fauna 33
2.3 Métodos para obtener la precipitación 33
2.3.1 Parámetros geomorfológicos directos e indirectos de la cuenca: 33
2.3.2 Lámina media hiperanual 36
2.3.3 Análisis de la calidad de los datos 37
2.3.4 Análisis estadístico de la homogeneidad de las series de datos de lámina de lluvia anual de las estaciones pluviométricas 41
2.4 Métodos para obtener el escurrimiento superficial 41
2.5 Temperatura 43
2.6 Humedad relativa 44
CAPÍTULO 3. MODELACIÓN ESPACIAL DE LAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS 46

3.1 Introducción 46
3.2 Modelos espaciales de las variables hidroclimáticas 46
3.2.1 Modelo del relieve 47
3.2.2 Modelo del tipo de vegetación y suelo 47
3.2.3 Modelos espaciales de la precipitación 48
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCION

A lo largo de la historia de la humanidad las áreas costeras y las cuencas hidrográficas asociadas a ellas, fueron centro de atracción de asentamientos humanos, lo que condujo al desarrollo de pequeñas y grandes ciudades, con todo lo que ello lleva asociado en términos de actividades económicas y por consiguiente de generación de residuales. Como consecuencia, en los últimos años, estas áreas se han convertido en puntos de preocupación y reflexión tanto del discurso teórico como político, entre otras razones por el importante deterioro social, económico y ambiental que han venido experimentando (MIZC, 2015).

La variabilidad climática ha sido motivo de atención internacional, la que aumenta ante la posibilidad de que ella también cambie, si el clima cambia. De aquí que, el cambio climático se convierte en uno de los retos más importantes que la humanidad tendrá que afrontar en el presente siglo, no solo por los impactos que este tendrá sobre las diferentes esferas humanas, sino porque el clima es una de las consecuencias de las interacciones y retroacciones que se establecen entre los componentes del sistema climático y responde a un equilibrio en el intercambio de energía, masa y cantidad de movimiento entre ellos, lo cual le confiere un alto dinamismo que se manifiesta por su variabilidad. Esta característica ha provocado, sobre todo en las últimas décadas, grandes desastres naturales con importantes consecuencias para la vida humana y la economía de muchos países (Centella *et al*., 2001).

En Cuba, esta situación es un tanto alarmante debido a la forma alargada y estrecha que presenta la isla (figura.I), cuya parte más ancha (Playa Tararaco Ganado - Punta Camarón Grande) mide 191 km y la más estrecha (Mariel - Majana) apenas 31 km, con una longitud de costas de 3 209 km al Norte y 2 537 km al Sur, trayendo como consecuencias la poca cuantía de recursos hídricos existentes. Se cuenta con 633 corrientes fluviales que desembocan superficial o subterráneamente al mar: 272 drenan al territorio de 32 283 km² hacia el Golfo de México y el Atlántico Norte, en general; mientras, 361 lo hacen hacia la cuenca del Mar Caribe, drenando un territorio de 48 860 km². En la provincia de Santiago de Cuba existen 22 Cuencas hidrográficas: 3 de interés Nacional, 2 Provincial y 17 Municipal (INRH Santiago de Cuba, 2016).

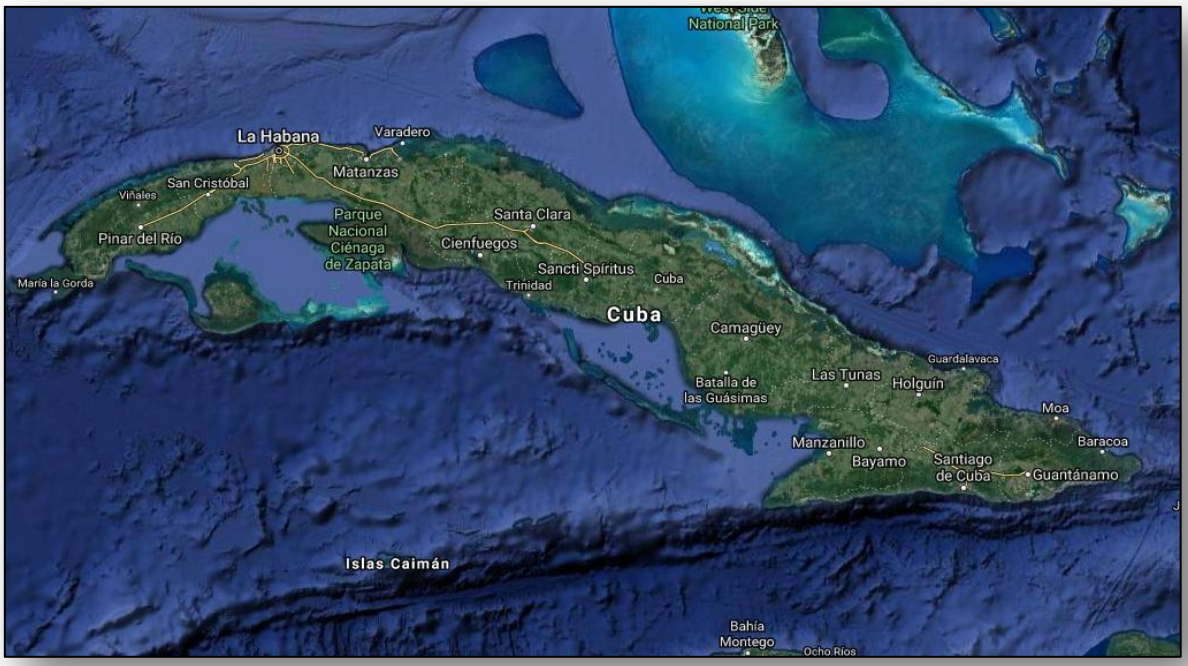


Figura I. Mapa Cuba. Fuente: Google Maps, (2019).

En la Bahía santiaguera desembocan varias cuencas hidrográficas de interés nacional ejemplo de ello es la cuenca del rio Cobre(nombre que hace referencia a los ricos yacimientos de este metal en Santiago de Cuba), el cual se encuentra dentro del área de influencia del “Proyecto 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, está inspirada en el pensamiento del líder histórico de la Revolución cubana Fidel Castro Ruz, cuando en la Cumbre de La Tierra en Río de Janeiro, el 12 de junio de 1992 expresó: “…Una importante especie biológica está en riesgo de desaparecer por la rápida y progresiva liquidación de sus condiciones naturales de vida: el hombre…”.

El río El Cobre, que recoge las aguas de la cuenca de igual nombre, nace en la vertiente Norte de la Sierra Maestra a 4,0 Km. al Oeste del pueblo, en los 20°02'12” latitud Norte y los 75°58'57” longitud Oeste, a 360,0 m de altitud. Desemboca en la bahía de Santiago de Cuba al

Suroeste de la ciudad, en los 20°01’00” lat. Norte y los 75°51’48” longitud. Oeste. Tiene 19,9 Km de longitud y corre en dirección Norte–Sureste, tiene dos afluentes principales (el Senserenico y el Santo Domingo), desemboca en el margen Oeste del lóbulo interior de la Bahía de Santiago de Cuba, constituye el 50.7% de las aguas que fluyen a la misma y el 21.9% de todas las aguas de la Cuenca Tectónica de Santiago de Cuba. Su corriente es permanente y las aguas se utilizan para el abasto a la población, la agricultura y la industria (BIOEC, 2006).

Con lo antes expuesto se hace necesario seguir fomentando el estudio sobre algunas de las variables hidroclimáticas en el área de estudio, todo esto debido a la influencia del cambio climático, por tanto, se debe incluir un análisis integrado de la temperatura, precipitación, escurrimiento superficial y humedad relativa.

En ello se hace necesario el Sistema de Información Geográfica (SIG) que funciona como una base de datos con información geográfica que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de los mapas digitales. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía. Este tipo de sistemas sirve especialmente para dar solución a problemas o preguntas sobre planificación, gestión y distribución territorial o de recursos. Son utilizados en investigaciones científicas, en arqueología, estudios ambientales, cartografía, entre otros campos.

Sin duda alguna tener en cuenta los estudios que incluyen análisis espaciales de algunas variables hidroclimáticas en el área de estudio son importantes por ser de gran utilidad en la planificación, ordenación del territorio y gestión ambiental, por lo que el conocimiento del comportamiento espacial de estas variables, permite planificar el uso de algunos recursos naturales tan preciados, como el agua. Asimismo, los resultados obtenidos ofrecen un marco útil para posteriores investigaciones para el enfrentamiento ante el cambio climático. Finalmente, el conocimiento de las variaciones climáticas y de la distribución espacial de los volúmenes de agua con que cuenta la cuenca hidrográfica, será de gran importancia en la medida en que sirve como base para planes de gestión regional, mediante la concertación y participación colectiva en la toma de decisiones de las medidas a adoptar.

Por consiguiente, se declara como **problema de investigación**:

Carencia de estudios que permitan evaluar el comportamiento espacial de las variables hidroclimàticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba, ante la influencia del cambio climático.

Objeto de investigación:

La cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.

Objetivo general:

Caracterizar el comportamiento espacial de las variables hidroclimàticas en la cuenca hidrográfica del río el El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.

Campo de acción:

Comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre.

Objetivos específicos:

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre los aspectos teórico-conceptuales de la temática de estudio.
- Recopilar información sobre las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.
- Determinar usando un SIG el comportamiento espacialmente las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre tributaria a la Bahía de Santiago de Cuba.

Hipótesis:

Si se caracteriza el comportamiento espacial de las variables hidroclimáticas en la cuenca hidrográfica del río El Cobre, se contará con una herramienta para la toma de decisiones en función de las políticas adoptadas en el enfrentamiento al cambio climático.

Estructura de la tesis:

CAPITULO No 1. Marco teórico- conceptual

CAPÍTULO No2. Materiales y métodos

CAPITULO No.3: Modelación espacial de las variables hidroclimáticas

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIAS

CAPÍTULO 1

CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO- CONCEPTUAL

1.1 Introducción

Este capítulo tiene como premisa fundamental realizar un breve, pero abarcador análisis de las diferentes fuentes bibliográficas referente a la zona de estudio; así como identificar los estudios realizados con respecto a la variabilidad hidroclimática en el área de estudio.

1.2 Cuenca

La cuenca es un "sistema continuo" de clima, suelos, cobertura vegetal, hábitats, red de drenaje, sistemas de producción y presencia humana a lo largo de su pendiente, que interactúa en el espacio y tiempo. La conjunción de estos factores permite identificar al colchón hídrico o sistema hidro-edáfico, que cumple un rol básico para el continuo funcionamiento del sistema. El suelo presenta una capacidad de retención hídrica que depende de los tipos de estructura y textura, de la cobertura vegetal, de la orografía y del clima reinante.

1.2.1 Cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parte aguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica). En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes).

Permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico, así como cuantificar e identificar los impactos acumulados de las actividades humanas o externalidades (sedimentos, contaminantes y nutrientes) a lo largo del sistema de corrientes o red hidrográfica, que afectan positiva o negativamente la calidad y cantidad del agua, la capacidad de adaptación de los ecosistemas y la calidad de vida de sus habitantes. Si se considera las externalidades generadas por distintas actividades humanas constatamos que el papel de cada actividad y, por ende, de cada actor es diferente en relación con su posición en la cuenca (cuenca arriba o aguas arriba o cuenca abajo o aguas abajo) (ver figura 1.1). Los movimientos de agua, suelos, nutrientes y contaminantes

provenientes de distintas partes de una cuenca crean una conexión física entre poblaciones distantes unas de otras (Swallow, et. al., 2001).

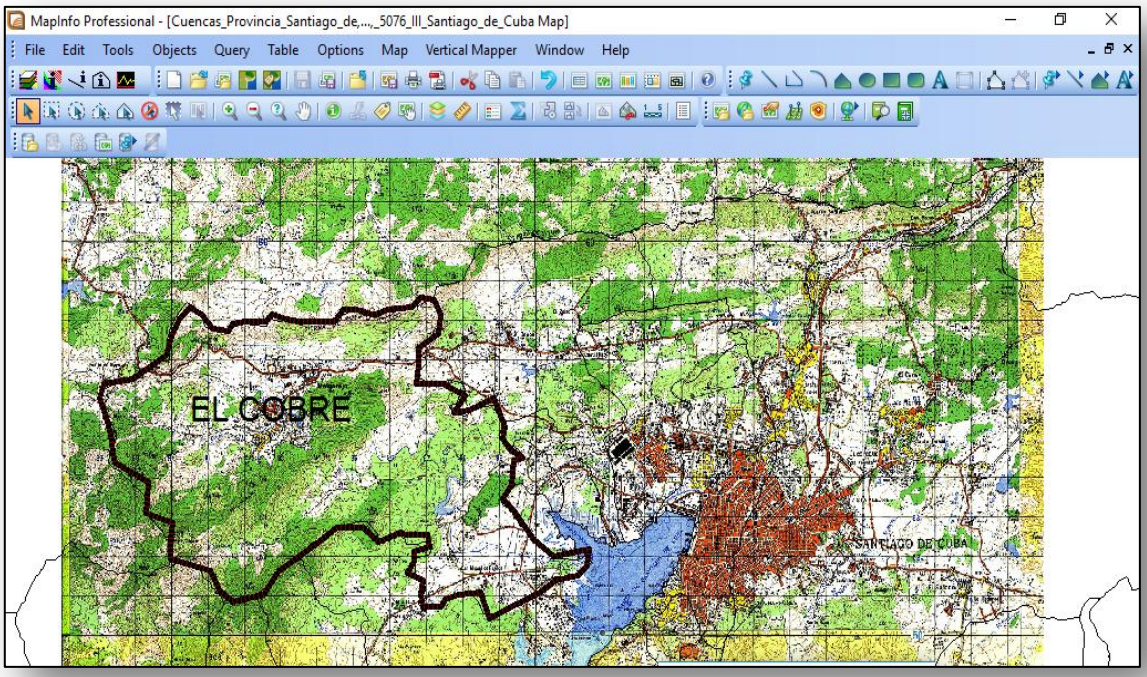


Figura1.1. Delimitación de una cuenca. Fuente: Elaborado por el autor.

Una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral, que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas, las cuales fluyen al mar a través de una red de cauces principales. En una cuenca hidrológica, además se incluye toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo, conformando un sistema integral, constituyendo un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad. La estabilidad y permanencia de todos sus componentes estructurales son propiedades y formas de comportamiento del sistema (Gaspari et al, 2009).

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)”.

Una cuenca hidrográfica se puede decir que está compuesta por determinadas partes, según el criterio que se utilice (Figura 1.2), por ejemplo:

1. La cuenca alta o sección alta de la cuenca, que corresponde generalmente con las áreas montañosas limitadas en su parte superior por las líneas divisorias de aguas;

2. La cuenca media o sección media de la cuenca, la cual comprende las zonas de pie de monte y valles bajos donde el río principal mantiene un cauce definido y,

3. La cuenca baja o zonas transicionales, tales como estuarios y humedales. Estas últimas son áreas de posicionales donde el río principal divaga e incluso desaparece como tal. Existen cuencas donde el contraste topográfico es tan marcado que sólo dos secciones —el alta y la baja— son identificables.

Figura 1.2. Partes de una cuenca hidrográfica. Fuente: CIAS, (1998).

Físicamente, la cuenca representa una fuente natural de captación y concentración de agua superficial, por lo que esta unidad territorial tiene una connotación esencialmente volumétrica e hidrológica. Pero, en tanto espacio social, la cuenca debe ser considerada como una realidad socialmente construida a partir de las relaciones económicas, culturales, sociales y políticas que se establecen entre los diferentes sectores. Por ello, la cuenca refleja la historia de

formación socio-espacial que las diferentes sociedades establecen, en el sentido de privilegiar determinadas actividades productivas en función de los grandes ciclos económicos que vinculan lo local con lo global. De esa manera, los actores sociales establecen campos y hábitos de acción que definen la forma como organizan su espacio y la manera como realizan sus prácticas productivas.

1.2.2 Importancia de la cuenca hidrográficas

Las cuencas hidrográficas albergan una gran variedad de plantas y animales, y brindan muchas oportunidades de esparcimiento al aire libre. Al proteger la salud de nuestras cuencas hidrográficas, podemos preservar y mejorar la calidad de vida de sus residentes.

Tanto las fuentes dispersas como directas de contaminación en una cuenca hidrográfica, contribuyen con nutrimentos, bacterias y contaminantes químicos. El manejo de las cuencas hidrográficas cubre todas las actividades dirigidas a identificar las fuentes y a minimizar la contaminación que llega a los cuerpos de agua, procedente de una cuenca hidrográfica. Comprende una superficie donde se capta o recoge el agua de lluvia. Estas alimentan el agua de los ríos, charcas, quebradas y otros cuerpos de agua cercanos. Son áreas naturales que recolectan y almacenan el agua que utilizamos para el consumo humano y animal, para los sistemas de riego agrícola, para dotar de agua a las ciudades y hasta para producir la energía eléctrica que alumbra nuestros hogares. Por eso, la preservación de las cuencas hidrográficas es un factor importantísimo para el desarrollo integral de nuestra vida.

La caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas es una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico, y tiene como propósito determinar índices y parámetros que permiten conocer la respuesta hidrológica en esta unidad de análisis espacial (cuenca).

1.3 Precipitación

La precipitación en los estudios hidrológicos es una variable de principal importancia puesto que, en cierto sentido, desencadena el resto de los procesos del Ciclo Hidrológico. Si este ciclo se define como el conjunto de estados y fases sucesivas por las que pasa el agua desde el momento en que precipita hasta que vuelve de nuevo a la atmósfera, desde el punto de vista de la cuenca, es la precipitación la variable que entra al sistema y se reparte en el resto de los procesos, infiltración, evapotranspiración, escorrentía.

Por otro lado, la principal fuente de humedad para generar la precipitación, lo constituye la evaporación desde la superficie de los mares lo que producirá la formación de nubes. Éstas son arrastradas por los vientos permaneciendo una cantidad sobre los océanos y otras son llevadas hacia los continentes. En este recorrido las gotas que forman las nubes se pueden agrandar, ya sea porque se juntan entre ellas o debido a la conglomeración de partículas que se presenta en la atmosfera. Cuando las gotas se agrandan, éstas caen por su propio peso hacia la superficie terrestre en estado líquido o sólido. Las precipitaciones que se desarrollan con temperaturas mayores a 0°C, caen en forma de lluvia. Las gotas de lluvia se congelan si la temperatura es menor a 0°C y caen en forma de granizo o nieve.

1.3.1 Formación de la precipitación

La formación de las precipitaciones se origina debido a que las masas de aire ascienden hasta las alturas de enfriamiento los cuales requieren tres condiciones:

Producirse un estado de saturación, un cambio de fase de vapor de agua a líquido o sólido y el crecimiento de pequeñas gotas o cristales de hielo que permitan su caída.

Con las dos primeras condiciones, se forman las nubes, pero no necesariamente se producen las precipitaciones. Para que se formen gotas de tamaño y peso suficiente, se requiere núcleos de condensación constituidos por polvo atmosférico o cristales de sales. Después de la nucleación, se generan en las nubes pequeñas gotas de diámetro de aproximadamente 0.02 mm, pero las gotas de lluvia tienen un diámetro de 0.5 a 2 mm.

Ello indica que el volumen de las gotas de las nubes sufre un aumento de un millón de veces su volumen. Este enorme aumento se debe a gracias a los siguientes fenómenos:

- Engrosamiento de una gota por la fusión y condensación de otras
- Atracción entre gotitas que conforman las nubes
- Las micro-turbulencias dentro de la masa de la nube.

El enfriamiento de una masa de aire para producir las precipitaciones se puede presentar de cuatro modos diferentes, lo cual se pueden clasificar en:

1) Ciclónica: suele denominarse precipitación frontal y puede incluir la lluvia de convergencia, ya que la zona de transición, entre las dos masas de aire, puede considerarse como frente.

2) Convergencia: cuando dos masas de aire se encuentran formando un ángulo obtuso y se produce un ascenso de aire húmedo.
3) Convección: el calentamiento diferencial de la superficie terrestre o marina, produce áreas cálidas, que provocan la elevación de masas de aire caliente.
4) Orográfica: debido a las tierras ubicadas en la altura, las masas de aire se ven forzada a elevarse cuando menos parcialmente.

1.3.2 Medición de la precipitación

Las precipitaciones se miden en términos de la altura de la lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. Esta medición indica la altura de agua que alcanzaría al formarse sobre una superficie horizontal impermeable.
La medición de las precipitaciones se efectúa mediante instrumentos de medición normalizados por la OMM (Organización Meteorológica Mundial), y se clasifican en pluviómetros y pluviógrafos.

1.3.2.1 Pluviómetro

Un pluviómetro es un instrumento que mide la cantidad de agua precipitada en un determinado lugar. La unidad de medida es en milímetros (mm). Una precipitación de 10 mm indica que, si toda el agua de la lluvia se acumulara en un terreno plano sin escurrir ni evaporarse, la altura de la capa de agua sería de 10mm. Los milímetros (mm) son equivalentes a los litros por metro cuadrado.
El pluviómetro únicamente proporciona la altura de precipitación total en intervalos previamente establecidos, comúnmente 24 horas, medidas a partir de las 8 de la mañana de cada día (Campos Aranda, 1992).
Pluviómetro estándar
El pluviómetro más común (Figura 1.3), que actualmente usan los aeropuertos y los meteorólogos oficiales, se inventó hace más de 100 años. Es un cilindro de 50cm de alto con un embudo de 20cm de diámetro. La altura del agua que se junta en el tubo de medición es precisamente diez veces lo que sería si se hubiera juntado en el cilindro solo. El pluviómetro recoge el agua atmosférica en sus diversos estados. El total se denomina precipitación. Para los estados sólidos, las mediciones se llevan a cabo una vez alcanzado el estado líquido.

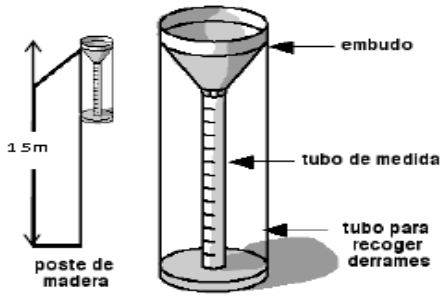


Figura 1.3. Pluviómetro. Fuente: Google Imágenes, noviembre 2014

Pluviógrafo

Un pluviógrafo registra la evolución de la precipitación con el tiempo, bien con tinta y papel, bien digitalmente. En algunos modelos el pluviógrafo suele estar dotado de un flotador que hace subir una plumilla que registra gráficamente el llenado del recipiente a lo largo del tiempo. El grafico obtenido directamente con la plumilla o representando lo datos digitales se denomina pluviograma, y refleja la precipitación acumulada en función del tiempo. (Figura.1.4)

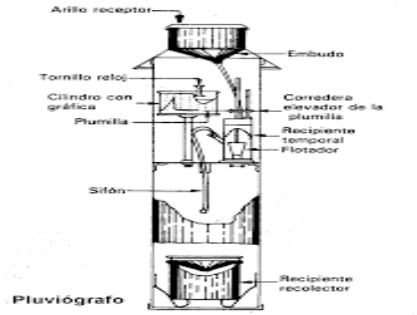


Figura 1.4. Pluviógrafo. Fuente: Pamplona, (2010).

Radar meteorológico

El radar meteorológico permite observar la posición y movimiento de las áreas de precipitación y determinados tipos de radares pueden proporcionar una evaluación de la intensidad de la lluvia en las zonas comprendidas dentro de su alcance; este último puede variar de 40 a 200 km según las características del haz de antena, la potencia de salida y la sensibilidad del receptor del radar. Se define como Alcance Hidrológico, a la distancia máxima a la que sigue siendo razonablemente valida la relación entre la intensidad de los ecos del radar y la intensidad de las precipitaciones (Campos Aranda, 1992).

1.3.2.2 Cálculo de la precipitación media en la cuenca

En el cálculo de la precipitación promedio en una cuenca, es necesario analizar las series de datos de precipitación disponibles, al menos por 30 años, de las estaciones meteorológicas existentes dentro de la cuenca y su periferia.

A partir de dicha información se puede ponderar la aportación espacial de cada sitio a través de los siguientes métodos: aritmético, Thiessen o de las curvas isoyetas, que se describen a continuación**.**

1.3.2.3 Método de la media aritmética

Este método consiste en calcular la lluvia promedio sobre un área determinada. Para ello se aplica un promedio aritmético de las alturas de agua de las precipitaciones registradas según las estaciones localizadas en el área de influencia; puede resultar útil por su simplicidad, pero para que la precipitación media sea representativa de la cuenca tiene que haber partido de datos tomados en una red de equipos con una densidad uniforme. Además, el método no recibe ni da información sobre las diferencias que puedan existir en la cuenca, por lo que sus resultados solo son representativos de cuencas con una variabilidad muy reducida.

Este método se recomienda en: regiones planas, con estaciones distribuidas uniformemente, con elevado número de pluviómetros y donde el gradiente de precipitación tenga una variación menor al 10% con respecto a la media.

Dada una cuenca, se toma como precipitación areal, es decir, aquella representativa de la caída sobre el total del área de la cuenca, a la definida por:

$$Pm = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n} \quad \text{.....(1)}$$

Dónde:

Pmed: Precipitación media de la zona o cuenca

Pi: Precipitación de la estación i

n: Número de estaciones dentro de la cuenca

Este método proporciona resultados confiables, dependiendo de la cantidad de estaciones disponibles en la zona, de la manera como éstas son localizadas y de la distribución que presenta la lluvia estudiada.

1.3.2.4 Método de las curvas isoyetas

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación (interpolación de líneas) llamadas isoyetas, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía.

En el trazado de las isoyetas no suele ser suficiente por lo general una simple interpelación lineal, sino que deberán tenerse en cuenta las características de ubicación de cada pluviómetro (situación, vegetación circundante, altitud, topografía, etc.), y según ellas se procederá a efectuar una interpelación racional**.**

El valor de la precipitación media, en la cuenca, se obtendrá a partir de la siguiente expresión:

$$P_{med} = \frac{\frac{P_0 + P_1}{2} A_1 + ... + \frac{P_{n-1} + P_n}{2} A_n}{A_1 + ... + A_n} \qquad P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{i-1} + P_i}{2} A_i \qquad \textbf{…….(2)}$$

Donde:

P med = precipitación media

At= área total de la cuenca

P i = altura de precipitación de las isoyetas i

A i = área parcial comprendida entre las isoyetas P i-1 y P i

n = número de áreas parciales

1.3.2.5 Polígonos de Thiessen

Este método es aplicable a zonas con una distribución irregular de estaciones y donde los accidentes topográficos no jueguen un papel fundamental en la distribución de la lluvia. La figura 1.5 muestra una imagen de este polígono.

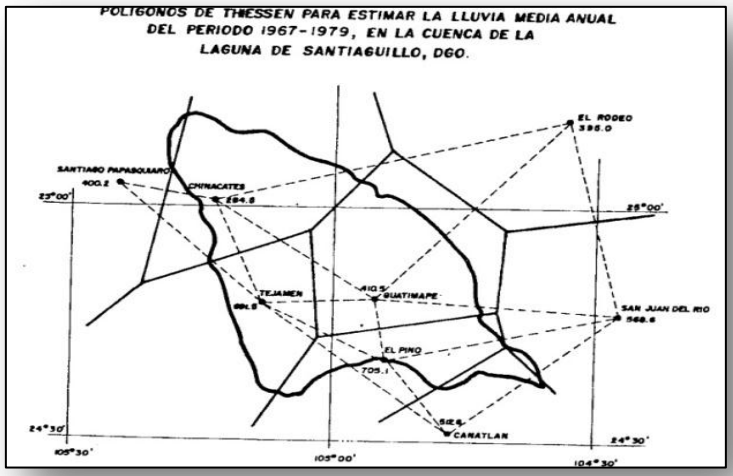


Figura 1.5. Polígonos de Thiessen. Fuente: Campos Aranda, (1992).

La precipitación media se determina mediante los siguientes pasos:

1. Se dibuja la zona en estudio con las estaciones pluviométricas (1, 2, 3, 4) y las circunvecinas (5).
2. Se une las estaciones con trazos rectos formando polígonos base.
3. Se unen las estaciones con trazo rectos, tratando de formar triángulos los menos agudos posibles.
4. Cuando los triángulos hayan sido dibujados, se trazan las mediatrices de todos los lados de los triángulos, formándose polígonos alrededor de cada estación.
5. Se mide el área de cada polígono que quede delimitado por el parte aguas de la cuenca.
6. Se aplica la siguiente fórmula:

$$Pm = \frac{\sum (ai * Pi)}{\sum ai} \quad \text{……..(3)}$$

donde:

ai = i enésima área del polígono dentro de los límites del parte aguas

Pi= precipitación de la i enésima estación

1.4 Temperatura

La temperatura, es la propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico. El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el grado de caliente o frío relativo y de la observación de que las variaciones de calor sobre un cuerpo producen una variación de su temperatura, mientras no se produzca la fusión o ebullición; suele ser una de las variables básicas del tiempo y el clima. Cuando preguntamos cómo está el tiempo afuera, casi siempre decimos algo sobre la temperatura, como hace frío o hace calor. De nuestra experiencia diaria, sabemos que la temperatura varía en diferentes escalas de tiempo en un mismo lugar, en periodos estacionales, diarios, horarios, etc., y varía también en el espacio.

Según (Campos Aranda, 1992) las sensaciones de calor y frio permiten formarse una idea de la temperatura, sin embargo, no hay que confundir la temperatura con la cantidad de calor que poseen los cuerpos, la cual es función de su capacidad calorífica. El calor es una forma de energía, en cambio, la temperatura no lo es, sino una medida de la cantidad de energía que posee un cuerpo como calor, es decir, que si se transmite calor a un cuerpo su temperatura aumentara y viceversa. Entonces, a pesar de las elevadas temperaturas que se tienen en el interior de la Tierra, la temperatura en la superficie dependerá únicamente de la radiación solar, ya que la conductividad de las rocas es por suerte bastante escasa. En general, la temperatura es uno de los caracteres más sensibles del clima, pudiéndose resumir los factores que la determinan en un cierto lugar:

1. Latitud
2. Altitud, debido a un gradiente medio de 0.6 grado Celsius por cada 100 m, los mapas de curva isotermas (curvas que unen puntos de igual temperatura) presentan gran similitud con el plano orográfico, incluyendo, por lo tanto, la altitud del lugar en su temperatura.
3. Características de la superficie terrestre.
4. Circulación general de la atmosfera y a la presencia de las llamadas Masas de Aire, la troposfera presenta un carácter discontinuo modificado constantemente la temperatura de un sitio específico.

En la actualidad se emplean diferentes escalas de temperatura, entre ellas están la escala Celsius, la escala Fahrenheit, la escala Kelvin, la escala Rankine o termodinámica internacional. En la escala Celsius, también conocida como escala centígrada, el punto de

congelación del agua equivale a 0° C y su punto de ebullición a 100° C, esta escala se utiliza en todo el mundo.

La escala Fahrenheit se emplea en los países anglosajones para medidas no científicas y en ella el punto de congelación del agua se define como 32° F y su punto de ebullición como 212° F. En la escala Kelvin, la escala científica de temperaturas, el cero se define como el cero absoluto de temperatura, es decir, -273,16° C. La magnitud de su unidad, llamada Kelvin, K, se define como igual a un grado Celsius (Meteorología Descriptiva, 2006).

1.4.1 Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición se explican a continuación:

Termómetros

Uno de los datos de mayor importancia para la meteorología y en especial para la climatológica , es la temperatura del aire ,para conocerla es preciso que el termómetro de medición se encuentre instalado en condiciones tales , que permitan la libre circulación del aire a su alrededor y que evítenla exposición directa a los rayos solares , debiendo que dar colocado lejos de paredes , arboles u otros objetos que pudieran reflejar el calor solar , o bien, servir de obstáculo a las corrientes de aire.

Tratando de uniformar las condiciones de instalación del termómetro, se ha adoptado el uso de la Garita Meteorológica de madera, de doble techo y paredes de persiana igualmente dobles, en cuyo interior el aire puede circular en todas direcciones (Figura 1.6).

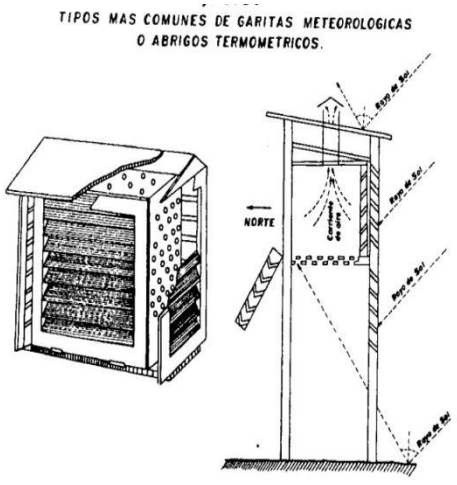


Figura 1.6. Garita meteorológica**.** Fuente: Campos Aranda, (1992).

Anemómetro

Anemómetro, termómetro y adquisidor de datos. Preciso medidor de aire para determinar la velocidad y temperatura del mismo con cálculo del volumen de corriente (cantidad de flujo) e interfaz RS-232. El medidor de aire convence por su buena relación de calidad. Este medidor de aire combina la precisión con la versatilidad, la posibilidad de guardar los datos de medición en la memoria interna directa o logger de datos) y la posterior transmisión a un PC o a un portátil. Este medidor de aire forma parte del equipamiento básico de un profesional del sector de la ventilación para regular y controlar o para analizar los posibles errores durante la transmisión de los datos. También se utiliza en investigación y desarrollo institucionales (Lara *et al*., 2014).

1.5 Humedad Relativa

La humedad relativa es el porcentaje de saturación de un volumen específico de aire a una temperatura específica. La humedad relativa del aire depende de la temperatura y la presión del volumen de aire analizado. Como la unidad de humedad relativa es por ciento, varía entre 0 (aire completamente seco) y 100% (aire saturado).

Por lo tanto, la definición matemática es:

RH = humedad relativa [%]; = presión de vapor saturado en el punto de rocío Td (normalmente en g/ (m^3));

E (T) = presión de vapor de saturación a la (real) temperatura del aire T (por lo general, en (g/m3).

La humedad relativa describe la cantidad de agua que se transporta por el aire, es importante para determinar el desarrollo de las nubes y el factor precipitación.

1.5.1 Instrumentos de medición

El Psicrómetro consta de dos termómetros iguales, uno de los cuales tiene su ampolla cubierta con una muselina limpia mojada en agua. El termómetro húmedo estará a una temperatura más baja que el termómetro seco, debido a la evaporación del agua de la muselina produce enfriamiento. Cuando el aire está seco, la evaporación será intensa y la diferencia de temperaturas entre los termómetros (Depresión del termómetro húmedo) será grande y al contrario cuando el aire está húmedo, ya que apenas se produce evaporación. Las temperaturas

del aire y del termómetro húmedo permiten obtener en las llamadas Tablas Psicométricas, la humedad relativa o la temperatura de un punto de rocío.

El Higrómetro tiene un elemento sensible a los cambios de humedad ambiente, existen varios tipos, el más común es el de cabello que se basa en la variación que experimenta el cabello con los cambios de humedad.

1.6 Escurrimiento Superficial

El escurrimiento superficial es el que se mueve por lo superficie del terreno hacia los cauces de drenaje durante y después de ocurrida la lluvia. Este escurrimiento marca el exceso de la capacidad de infiltración del suelo (Murillo, 2010).

El escurrimiento superficial es el agua que discurre sobre la superficie del terreno hasta el cauce. Es el flujo de agua que por gravedad se mueve en la superficie del suelo, según la pendiente del terreno, y ha escapado de la filtración, de la evaporación y del almacenaje superficial. Parte del agua que cae como lluvia en la tierra fluye sobre la superficie del suelo como escurrimiento superficial, pero puede transcurrir un largo plazo entre el instante en que las primeras gotas de un aguacero caen en un punto dado de la cuenca vertiente y aquel en que se observa un aumento del caudal a la salida de ella, esto es debido a que no se produce escurrimiento superficial hasta que la intensidad de la lluvia no sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo.

El escurrimiento 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 escurrimiento, éste se puede dividir en: superficial, subsuperficial y subterráneo (Figura 1.7).

- Escurrimiento o escorrentía superficial. Es la parte del agua que escurre sobre el suelo y después por los cauces de los ríos.
- Escurrimiento 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.

- Escurrimiento 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.

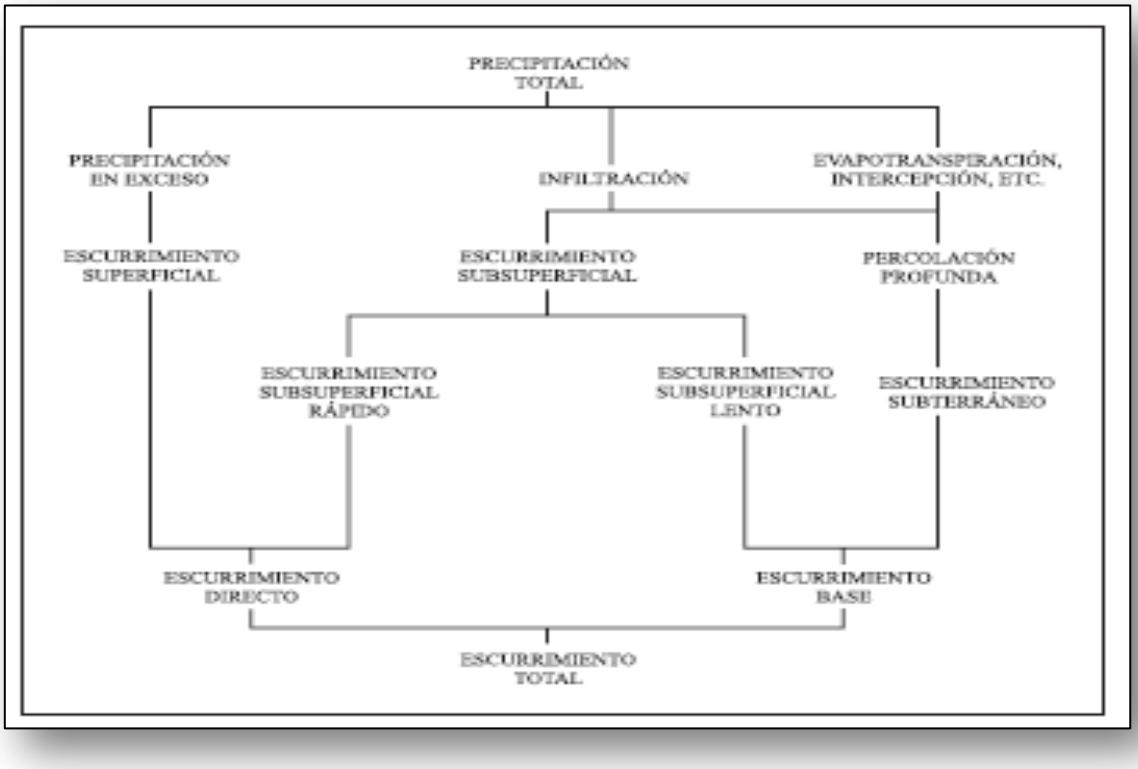


Figura 1.7 Diagrama que explica el escurrimiento. Fuente: Ven Te Chow, (1964).

1.6.1 Factores que afectan el escurrimiento

Los factores, que afectan el escurrimiento pueden dividirse en dos grandes grupos.

1. Factores **meteorológicos,** aquellos asociados con la precipitación: forma, tipo, intensidad, duración y frecuencia de la lluvia, cantidad y la distribución de la lluvia en el área de drenaje.
2. Factores **fisiográficos**, los asociados con las características de la cuenca o áreas de drenaje: el tamaño, forma, pendiente, elevación relativa del área drenada, la

permeabilidad del suelo, el tipo de vegetación, la humedad antecedente y la capa freática.

1.6.2 Instrumentos de medición del escurrimiento superficial

Limnímetros:

Escala o Limnímetro es una regla graduada generalmente de 1m de longitud que tendrán una longitud suficiente como para poder registrar todas las fluctuaciones del nivel de las aguas, pueden ser de un solo tramo o estar divididas en varias secciones, son construidas de varios materiales, tales como hierro, madera, hormigón etc.

Limnígrafo

Aparato utilizado en la medición de los niveles de una corriente, el cual registra el nivel de manera continua mediante el movimiento de un flotador que hace que una plumilla registre en una carta o cinta registradora (limnigrama) colocada con un tambor giratorio.

1.6.3 Métodos para la estimación del escurrimiento superficial

En el cálculo del escurrimiento medio en cuencas pequeñas o áreas de drenaje reducidas, es necesario conocer el valor de la precipitación media, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento. La fórmula a utilizar sería la siguiente:

$$Vm = C * Pm * A \qquad (4)$$

Donde:

Vm = Volumen medio que puede escurrir (m 3)

A = Área de la cuenca (ha)

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

Pm = Precipitación media (mm)

Al aplicar esta fórmula, es indispensable determinar cada uno de los factores que en ella intervienen y para lograrlo deben seguirse los pasos siguientes:

1) Se obtiene el valor del coeficiente de escurrimiento (C), de acuerdo con los tipos de suelos, uso del suelo y pendiente. Cuando el área de drenaje presenta diferentes tipos de

suelos, vegetación y pendiente media. El coeficiente de escurrimiento (C), se obtendrá para cada área parcial y posteriormente se calculará el promedio ponderado para aplicarlo en la ecuación anterior.

2) Se obtiene el área de drenaje por medio de cartas topográficas, fotografías aéreas o por un levantamiento directo en el campo.

3) Se localiza el área en estudio y se determina la precipitación media anual. En el caso de requerir mayor precisión en los cálculos se recurre a la estación meteorológica más cercana al área de estudio y se obtienen los registros anuales y/o mensuales de precipitación pluvial media. Con esos valores se determinan los volúmenes medios anuales escurridos.

3) Con esta información se procede a calcular los volúmenes medios escurridos mediante la ecuación anterior (Tabla 1.1).

Tabla1.1. Valores del coeficiente de escurrimiento.

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

En la zona oriental para calcular el escurrimiento medio en cuencas pequeñas o áreas de drenaje reducidas, es necesario conocer el valor de la precipitación media, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento. La fórmula a utilizar sería la siguiente:

Fórmulas empíricas

- Recomendaciones del Ing. J. L. Batista: Primera variante (1973)

El autor relaciona el escurrimiento medio anual con las lluvias anuales para las provincias Orientales, empleando la siguiente expresión (Batista, 1973):

$$Uo(Yo) = f[0.714 * U1(Po) + 0.244 * U2(Hm)] \qquad (5)$$

donde:

Po: precipitación media hiperanual de la cuenca (*mm*).

Uo(Yo); U1(Po); U2(Hm): son variables normalizadas del escurrimiento, la lluvia y la altura media de la cuenca. Se obtienen por gráficos y tablas.

Hm: altura media de la cuenca (*m*).

Yo: lámina del escurrimiento medio hiperanual (*mm*).

El error promedio cuadrático del cálculo según datos del método es de $\pm 13.7\%$.

- Recomendaciones del Ing. J. L. Batista: Segunda variante (1982)

$$Uo(Yo) = f[0.879 * U1(Po)] \qquad (6)$$

donde:

Uo(Yo); U1(Po)): son variables normalizadas del escurrimiento y la lluvia. Se obtienen por gráficos y tablas.

El error promedio cuadrático del cálculo según datos del método es de $\pm 15\%$

- Recomendaciones del Ing. J. L. Batista: Tercera variante (1993)

$$Mo = 2.53 Po^{2.72} * 10^{-8} \qquad (7)$$

donde:

Mo: módulo de escurrimiento hiperanual de la cuenca en estudio *(l/s-km^2)*.

Po: precipitación media hiperanual de la cuenca (*mm*).

- Fórmula del Ing. Nadir Fernández

Según el autor en gran parte de región oriental se manifiesta una estrecha relación del escurrimiento con la altura media de las cuencas (*Hm*). Además, en los límites del territorio estudiados se destacan dos relaciones lineales bastante fundamentadas, las cuales corresponden a dos zonas definidas por Nadir (1990):

Para la Zona I la ecuación de regresión es la siguiente:

$$Mo = 0.044Hm + 1.9 \qquad (8)$$

El error cuadrático promedio de la ecuación de regresión es 3.1 *l/s-km*^{2}, o sea, el 22 %.

Para la Zona II la ecuación de regresión es la siguiente:

$$Mo = 0.053Hm - 3.6 \qquad (9)$$

dónde:

Hm: altura media de la cuenca (*m*).

Mo: módulo de escurrimiento hiperanual de la cuenca en estudio *(l/s-km*^{2}*)*.

El error cuadrático promedio de la ecuación de regresión es 1.9 *l/s-Km*^{2}, o sea, el 12%

1.7 Software para la realización de los modelos espaciales

Una definición un poco antigua pero amplia de SIG es la que dieron Dueker y Kjerne (1989) sistema de hardware, software, datos, personas, organizaciones y acuerdos institucionales para recopilar, almacenar, analizar y diseminar información acerca de diferentes porciones de la superficie terrestre. Esta definición resalta el carácter corporativo y complejo de los SIG.

Los SIG incluyen por tanto numerosas funciones para el manejo de datos espaciales en formato digital. Estas funciones pueden clasificarse en:

1. **Almacenamiento** de datos espaciales y temáticos. Para ello es necesario definir modelos de datos con los que codificar los diferentes aspectos del territorio.
2. **Visualización** de estos datos en forma de mapas, tablas o gráficos.

3. **Consultas** que permiten seleccionar aquellos elementos que cumplen un conjunto de condiciones, de tipo espacial o no espacial. Los resultados pueden obtenerse como un valor, una tabla o un mapa.

4. **Análisis de datos**. Búsqueda de regularidades en los datos que permitan verificar hipótesis acerca de los mismos.

5. **Modelización**. Bien utilizando los resultados de los análisis de datos (modelos estadísticos) o bien aplicación de modelos físicos. Permiten utilizar el modelo matemático del territorio almacenado en el SIG para utilizar y validar diversas hipótesis.

El campo de los SIG es altamente pluridisciplinar, integrando a especialistas de diversas ciencias; se ha hecho tan amplio que hoy en día pueden distinguirse fácilmente tres tendencias en la utilización de los SIG:

• **Cartografía de alta precisión** combinada con herramientas de CAD con aplicaciones en arquitectura e ingeniería. Se asume que los elementos cartografiados son estáticos (alta inversión).

• **Servidores de mapas** a través de Internet con aplicaciones en ordenación del territorio y servicios turísticos. Típica implementación AM/FM (AutomatedMapping/Facilities Management)

• **SIG para modelización ambiental**, enlazado con herramientas de análisis de datos y modelización con aplicaciones diversas en las ciencias de la Tierra. El asunto que nos concierne está más vinculado, evidentemente, a esta última.

Según Goodchild, (1993) un SIG destinado al análisis de datos y modelización ambiental debe incorporar un conjunto de herramientas para:

• Pre procesar grandes volúmenes de datos y prepararlos para su análisis

• Analizar los datos con el objeto de descubrir regularidades y desarrollar modelos

• Implementar estos modelos

• Reorganizar los resultados en modo de tablas, gráficos o mapas de forma que sean útiles para el usuario

En muchos casos resulta preferible incorporar programas externos de modelización que trabajen en coordinación con un SIG. Las diferentes formas de integrar ambos programas

fueron resumidas por Fedra, (1993) en 4 tipos de unión entre un SIG y un programa de modelización:

• Dos programas separados utilizando ficheros comunes. En muchos casos la utilización de un SIG para modelización se ha centrado en el primero y el último de los puntos señalados anteriormente utilizando un programa específico para analizar y modelizar con el que el SIG se comunica a través de archivos de intercambio. Este esquema se denomina enlace débil (loosecoupling) entre el SIG y los modelos.

• Dos programas separados utilizando ficheros comunes y una interfaz de usuario común.

•Integración de funciones de diferentes programas en una arquitectura abierta en el que las diferentes herramientas se interrelacionan y se imbrican en un lenguaje.

• Integración de uno de los programas como parte del conjunto de funciones del otro.

Hoy en día para manejar una cuenca con un enfoque integral, se necesita sistematizar mucha información y en base a su análisis planear acciones de manejo, en la actualidad contamos con información digital, de aspectos topográficos y teledetección que manejados en base de un Sistema de Información Geográfica provee diversas funciones de análisis que permiten manipular las diferentes variables utilizadas en los procesos de estimación de parámetros hidrológicos, básicamente, el empleo adecuado de dichas funciones hace posible la implementación de mecanismos efectivos para la estimación de aquellos parámetros de uso frecuente en las cuencas hidrológicas como son área, perímetro, longitud del cauce principal, red de drenaje, pendiente de la cuenca e índice de compacidad (Lollett y Lazo, 1997).

Como Sistema de Información Geográfica (SIG) en la presente investigación el uso del MapInfo Professional se hace necesario debido a su gran utilidad para analizar e identificar relaciones entre los elementos geográficos necesario para la toma de decisiones: captura, consulta, edición, análisis y reportes de Información Geográfica dinámicamente relacionada con Bases de Datos. Es la elección de analistas de negocio y profesionales de SIG en todo el mundo para visualizar y analizar las relaciones entre datos y geografía. Algunas características clave serían perfecta conectividad con bases de datos relacionales, representación de mapas 3D y herramientas de listado, un creador de informes integrado, ricas funciones de representación temática y múltiples opciones de publicación.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

La investigación fue diseñada a través de la recopilación, análisis y síntesis de la información de la cuenca hidrográfica del río El Cobre.

2.2 Caracterización del área o zona de estudio

La cuenca hidrográfica El Cobre se localiza en la parte suroeste de la ciudad de Santiago de Cuba, limitada por los asentamientos de Yarayabo y la Clarita, al Sur por la bahía de Santiago de Cuba, al este por la Sierra de Boniato y al Oeste por la cuenca del río Nima Nima. La cuenca ocupa un área de 65,2 Km^2 (Figura 2.1).

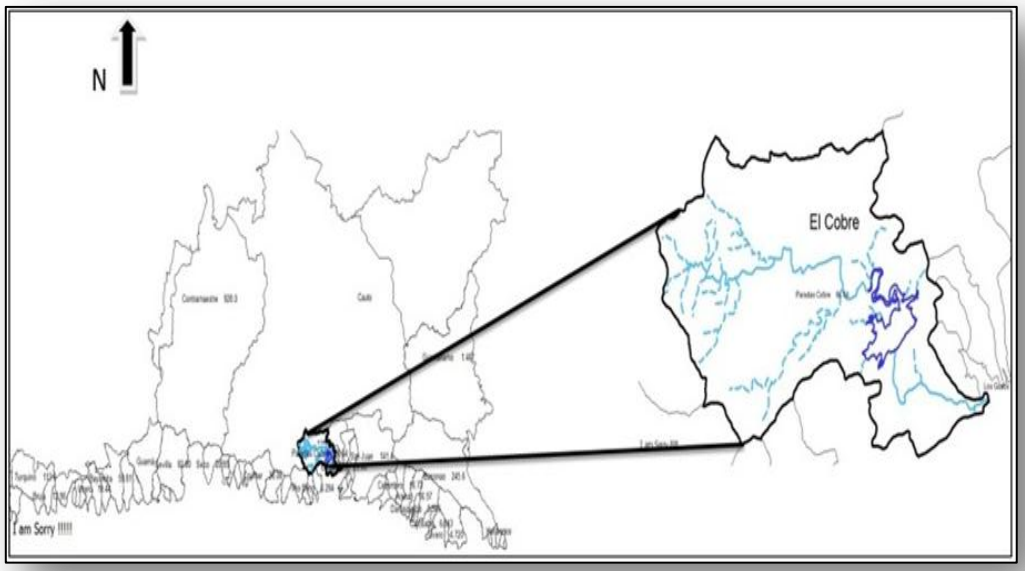


Figura 2.1. Zona de estudio (Cuenca Hidrográfica “El Cobre”). Fuente: Elaboración propia del autor.

La zona de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica (figura 2.1) del río El Cobre que nace en la vertiente Norte de la Sierra Maestra a 4,0 Km. al Oeste del pueblo, en los 20°02'12” latitud Norte y los 75°58'57” longitud Oeste, a 360,0 m de altitud. Desemboca en la bahía de Santiago de Cuba al Suroeste de la ciudad, en los 20°01’00” lat. Norte y los 75°51’48” longitud. Oeste. Tiene 19,9 Km. de longitud y corre en dirección Norte–Sureste, tiene dos afluentes principales (el Senserenico y el Santo Domingo), desemboca en el margen Oeste del lóbulo interior de la Bahía de Santiago de Cuba.

El área de estudio ocupa el 50.7% de las aguas que fluyen a la bahía y el 21.9% de todas las aguas de la Cuenca Tectónica de Santiago de Cuba. Su corriente es permanente y las aguas se utilizan para el abasto a la población, la agricultura y la industria. Sus aguas están reguladas por el Embalse Parada, que posee una capacidad total de 34.2 millones de m^3 y una capacidad de entrega de unos 8.5 millones de m^3 anuales.

El río el Cobre de 74.5 km² tiene una regulación de su escurrimiento en las coordenadas, 153.5 Norte y 598.0 Este, el cual altera el escurrimiento natural del río, embalsando un volumen de agua de 34.21 millones de metros cúbicos (34.21x106 m^3) en el nivel de aguas normales (N.A.N) y de 57.2 millones de metros cúbicos (57.2x106 m^3) en el nivel de aguas máximas (N.A.M) (del Rio, 2013).

2.2.1 Geología

El área que ocupa la cuenca hidrográfica se encuentra ubicada en la zona estructuro-facial Caimán, la cual constituye un anticlinorio alargado, cuyo eje forma un arco suave cóncavo hacia el sur. La mayor parte del flanco meridional fue cortado por una falla profunda de tipo transversal que se sumergió en la fosa de Bartlett, predominando en su estructura una yacenciaisoclinal, subordinadamente distorsionada por pliegues tumbados y sobre corrimientos de menor importancia.

2.2.2 Geomorfología

El área ocupada por la cuenca se encuentra ubicada en el macro bloque montañoso Sur Oriental de la Sierra Maestra, dentro del meso bloque Meseta de Boniato-Depresión Graben de Santiago de Cuba, donde ocurren fracturamientos tectónicos muy intensos, que demuestran la presencia de movimientos geotectónicos débiles a moderados. La unidad geomorfológica de la Sierra del Cobre es relativamente pequeña, pero peculiar y accidentada del Anticlinorio Sierra Maestra. Linda al Oeste – en la línea de empalme de los valles opuestos del río Canímar y río Cañas (afluente derecho del río Cauto) – con la Cordillera del Turquino (Grupo del Jobo); al Este cae abruptamente a la Cuenca de Santiago de Cuba; y al Norte a la profunda depresión subsecuente erosivo-estructural de la Cuenca del Cobre, que la separa de la Sierra de Boniato.

2.2.3 Relieve

La cuenca El Cobre se extiende sobre la porción oriental de la Sierra del Cobre, donde se localiza su punto hipsométrico de mayor altitud sobre el nivel del mar con 1100 metros. Es un territorio irregular en toda su extensión con predominio de alturas y montañas bajas. Las partes llanas o de menor elevación se desarrollan hacia la parte oriental y sur, constituyendo la extensión del valle del río El Cobre. El 35 % de la superficie de la cuenca presenta una altitud entre 16 y 200 metros. Estas llanuras onduladas constituyen el mayor espacio de desarrollo económico y social del territorio. La cercanía entre estos dos conjuntos orográficos indica lo intrincado del territorio, encontrándose casi el 25 % del mismo con alturas superiores a 400 metros. Las pendientes predominantes oscilan entre 0 y 8 por ciento, coincidiendo estas con las zonas menos elevadas, la inclinación aumenta hacia la Sierra del Cobre.

2.2.3 Características climáticas generales

En el registro de las precipitaciones se cuenta con los pluviómetros ubicados en la cuenca y que forman parte de la Red Pluviométrica del Sistema de Recursos Hidráulicos. El pluviómetro No 1 que lleva por nombre La Lucha, se localiza en una vivienda ubicada entre El Turquino y El Manier con coordenadas (590.5; 155.2). El pluviómetro No 2 es el que se encuentra en la Oficina de Correos de El Cobre en las coordenadas (592.9; 155.5) y el pluviómetro No 3 está ubicado en el Embalse Parada en las coordenadas (597.3; 153.3); con un registro de lluvia media anual de 1154 mm^3.

En sentido general, se pode señalar que el territorio se caracteriza por presentar un clima con predominio de condiciones tropicales marítimas (Köeppen), 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. El régimen de temperaturas se caracteriza por alcanzar un valor medio anual de 26,1 ºC. Las mínimas medias se registran durante los meses de enero y febrero (20,4 y 20,5 ºC respectivamente) y las máximas medias durante julio-agosto con 33,9 y 34,0 ºC.

2.2.4 Suelos y sus procesos de erosión

En la región de estudio se describen los siguientes tipos de suelos: lithosoles, pardos, fersialítico pardo rojizo y fluvisol, de los cuales, al nivel de extensión de cada uno de ellos, se destacan los pardos y los lithosoles, que en conjunto ocupan alrededor del 80% de la región y representan el 41% ocupando el primer lugar entre los suelos los lithosoles presentes en la zona, relacionados mayormente con las rocas efusivas: andesito-basaltos y andesito-dacitas. De acuerdo con los resultados de los análisis químicos, el fósforo es no detectable. El nivel de materia orgánica, aunque ligeramente superior al valor en el suelo fersialítico pardo rojizo, es bajo y no presentan una amplia distribución en la región y sólo los suelos fersialíticos pardo rojizos se localizan en dos parches aislados, el mayor de los cuales está ubicado casi en la parte central de la cuenca agrupan a los suelos que se caracterizan por presentar un proceso de evolución los fluvisolesaluvial, asociados a los cauces fluviales y valles de inundación, en general son suelos con textura arenosa gravosa y poca materia orgánica.

2.2.5 Flora y vegetación

Los datos de la flora y vegetación fueron tomados del Estudio de Impacto Ambiental de Oro Barita donde se plantea que la vegetación original en la región está constituida por bosques semideciduos mesófilos hasta una altitud de 400 a 450 msnm y en menor medida los bosques siempre verdes a partir de este límite altitudinal. En la actualidad, la vegetación secundaria se ha convertido en la predominante a partir de las degradaciones sufridas por la vegetación autóctona, debido a la asimilación agrícola, pecuaria, forestal, minera poblamiento humano.

En la cuenca superior del río Parada, predominan los tipos de vegetación secundaria, en diferentes variantes (bosques secundarios mixtos, con dominancia de leguminosas, matorrales secundarios con árboles aislados y herbazales secundarios de gramíneas y gramíneas y arbustos. Le siguen en extensión la vegetación cultural (pastos con árboles y arbustos y mezcla de cultivos). La vegetación natural está representada por relictos de bosque semideciduos mesófilo. La riqueza florística del área de estudio está dada por 85 taxainfragenéricos pertenecientes a 44 familias e incluidos en 81 géneros. Las familias con mayor número de taxas son Mimosaceae (9), Fabaceae (7), Poaceae (7), Anacardiaceae (4), Asteraceae (4), Caesalpiniaceae (4) y Euphorbiaceae (4).

2.2.6 Fauna

Los datos de la fauna fueron tomados del Estudio de Impacto Ambiental de Oro Barita referidos en el informe de Evaluación y diagnóstico sobre la degradación ambiental de la mina El Cobre, donde se plantea que las comunidades faunísticas presentes en el área de estudio son la de fauna asociada al hombre (antropóxena) y la de fauna higrófila de bosques submontanos. La fauna asociada a esta área es pobre debido a la fuerte transformación a que han sido sometidos los hábitats naturales.

En la región de estudio se registraron en total 29 especies endémicas, pertenecientes a todas las clases zoológicas analizadas, menos insectos. Se destacan los arácnidos, los reptiles y las aves. Del total de especies zoológicas endémicas solo 5 presentan un área de distribución restringido: los arácnidos Alayotityusnanus, Cazieriusgundlachii, Paraphrynusrobustus, Pseudocellusparadoxus (Cuba oriental) y el molusco terrestre Troschelvindexauriferum (Sierra Maestra). Ninguna de estas especies fue hallada en el área de la concesión, aunque han sido reportadas por la literatura para esta zona.

2.3 Métodos para obtener la precipitación

En la obtención de las precipitaciones se utilizan los siguientes métodos. Los cuales sse describen con sus ecuaciones y parámetros de cálculo.

2.3.1 Parámetros geomorfológicos directos e indirectos de la cuenca:

En este punto es importante aportar la mayor cantidad de información posible para que así cualquier persona pueda hacerse una idea de cómo es el lugar que estamos tratando, además de facilitarle su localización.

El estudio de las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica el Cobre, soluciona problemas debidos a la falta de información de características y rasgos propios de la superficie terrestre, los cuales influyen en su comportamiento hidrológico, hidráulico e hidrodinámico. A continuación, se presentan las características geomorfológicas y fórmulas utilizadas en el área de estudio (tabla1).

Tabla 2.1**. Parámetros geomorfológicos directos de la cuenca. Fuente: GEARH.**

Cuenca	Coordenadas N	E	Ac (km²)	Hm (m)	Yc (0/00)	Yr (0/00)	Dd (km/km²)	Lr (km)	H1	H2	Clasificación	Pc (km)
El Cobre	151,9	601,5	65,2	169	204	19.0	1.09	19.9	380	0	P	45

Donde:

Ac: Área de la cuenca (km²)

Pc: Perímetro de la cuenca (km)

Hm: Altura media de la cuenca (m)

Yc: Pendiente de la cuenca (0/00)

Lr: longitud del río (m)

Yr: pendiente del río principal (0/00)

Hm1: Cota del nacimiento del río (m)

Hm2: Cota de la desembocadura del río (m)

La clasificación de la corriente identifica si son permanentes (P) o intermitentes (I).

- **Densidad de drenaje:**

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^{m} l_i}{Ac}$$

Donde:

Σl_i : Suma de las m corrientes del sistema fluvial (*km*).

Ac: área de la cuenca (km^2).

Dd: densidad de drenaje (km/km^2).

- **Longitud media de las laderas**

$$Lc = \frac{1000}{1{,}8 \cdot Dd}$$

Donde:

Lc: longitud media de las laderas de la cuenca (*m*).

- **Coeficiente de asimetría**.

$$a = \frac{\Delta A}{Ac / 2}$$

Con: $\Delta A = |Ader - Aizq|$

ΔA: diferencia entre el área a la derecha e izquierda del río principal (km^2).

Ac: área de la cuenca (km^2).

No se puede determinar porque no conocemos la diferencia entre el área a la derecha e izquierda del río principal.

- **Anchura media**.

$$B = \frac{Ac}{Ld}$$

Donde:

Ac: área de la cuenca (km^2).

Ld: línea recta, paralela al cauce principal, que une el cierre de cálculo con el punto más alejado de la cuenca localizado.

B: anchura media (*km*).

- **Coeficiente de forma.**

$$\gamma = \frac{B}{Ld}$$

Como $B < Ld$, $\gamma < 1$, la cuenca será más bien alargada, lo que será más pronunciado en la medida que el coeficiente de forma se acerque al valor cero.

- **Coeficiente de compacidad**.

$$Cc = 0{,}282 \frac{P}{\sqrt{Ac}}$$

Siendo:

P: perímetro de la cuenca (km).

Ac: área de la cuenca (km^2).

- **Frecuencia de las corrientes.**

$$Fc = 0{,}694\ Dd^2$$

- **Relación de bifurcación.**

$$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Donde:

N_u: número de cauces de orden u.

N_{u+1}: número de cauces de orden u +1 (orden superior).

Rb: relación de bifurcación de cauces de orden u (adimensional).

$$N_u = Rb^{(k-u)}$$

Donde:

k: número de orden del cauce principal.

No se puede determinar porque no se conoce el orden de los causes.

2.3.2 Lámina media hiperanual

La lámina media Hiperanual se determina mediante el análisis multivariado:

Procesamiento estadístico de las series de observaciones de los pluviómetros y empleo de planos isoyéticos, que se actualizarán de ser posible. (EIPHH, 2003). La secuencia general de análisis comprende:

1. Estudio de la disponibilidad de datos o registros.

2. Estimación de datos o registros faltantes.
3. Control de la calidad de los datos.
4. Análisis de probabilidades.

- **Metodología:** En el cálculo de la lluvia media hiperanual, se utilizó el método aritmético.

- **Recopilación y procesamiento de datos:** Las series de datos no comenzaban en el mismo año, por tanto, se tomaron a partir del año 1966 hasta el 2014 debido a la correspondencia de los datos de las tres series para poder utilizarlos, realizar el completamiento y posteriormente su análisis estadístico para determinar la lluvia media de la cuenca. Los pluviómetros se ubican dentro de la cuenca según la figura 2.4.

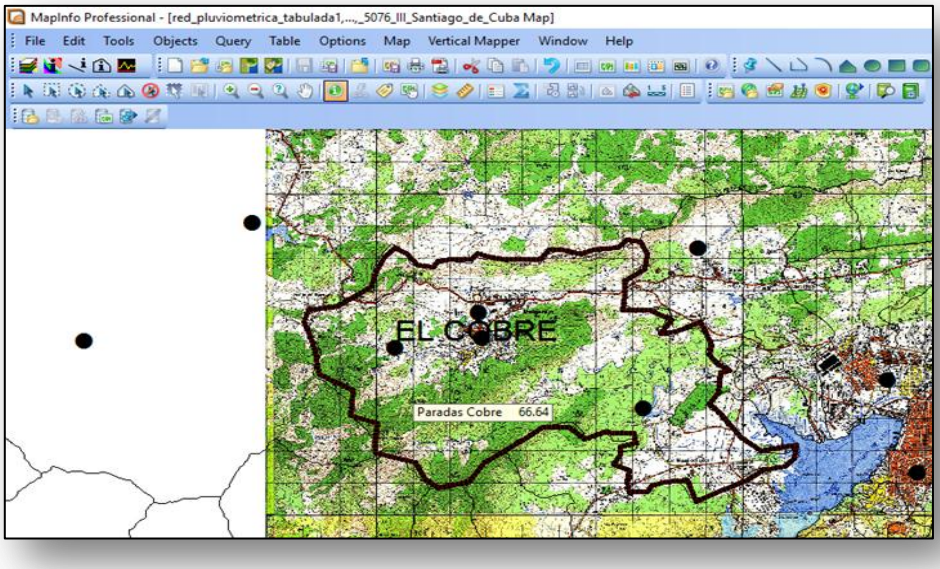


Figura 2.4. Pluviómetros localizados en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia del autor.

Se localizaron tres pluviómetros en la zona de estudio, teniendo en cuenta las coordenadas de cada uno de ellos y la incidencia sobre el área de la cuenca.

2.3.3 Análisis de la calidad de los datos

El análisis de la calidad del dato hidrológico consistirá en detectar valores dudosos o erróneos, ya sea por exceso o por defecto. La presencia de valores dudosos se podrá confirmar por medio de comparaciones entre los registros de estaciones vecinas, estos valores se confirman, se corrigen o bien, se eliminan (Marrero *et al*., 2007).

Acosta *et al*., (1997) plantea que antes de desarrollar cualquier modelación probabilística de una variable hidrológica se hace necesario un análisis de homogeneidad para determinar las condiciones de los registros. Si se detectan cambios de cualquier origen en la serie, se deben identificar, modelar, estimar y, en algunos casos remover de los conjuntos de registros.

El análisis de la homogeneidad comprende dos fases:

- La fase exploratoria que permite la detección de comportamientos específicos de la muestra o propiedades importantes de los registros esto se logra mediante análisis gráficos y el cálculo de estadígrafos básicos.
- La fase confirmatoria que permite la verificación estadística de la presencia o ausencia de tales comportamientos o propiedades, mediante pruebas de hipótesis. En esta fase se incluyen las pruebas estadísticas de detección de cambios en la media y la varianza y la tendencia en las series.

-Metodología: Se analizará la calidad de la serie de datos de cada pluviómetro mediante las pruebas paramétricas y no paramétricas, para ello se determinará la homogeneidad de la serie de datos para cada una de las pruebas correspondientes y si hay buena o mala auto correlación, para llegar a una conclusión con respecto a la homogeneidad en general de la serie de datos.

- **Recopilación y procesamiento de datos**: La recopilación y procesamiento de datos se realizó para cada pluviómetro para pruebas paramétricas y no paramétricas (Tabla 2.2)

Tabla 2.2. Coordenadas de la cuenca en estudio. Fuente: GEARH.

Nombre del Equipo	No de Control	No de Cuenca	Coordenadas N	Coordenadas S	Altitud	Año de Inicio
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

Serie de los datos de láminas de lluvias anuales completadas de las estaciones hidrométricas (1966-2014), se muestran en las tablas (A, B, C):

Pluviómetro 1331
Parada

Año	Lámina de lluvia anual (mm)
1966	1391
1967	449,9
1968	453
1969	825,9
1970	917,2
1971	425,1
1972	975,6
1973	141,4
1974	824,2
1975	438,9
1976	420,1
1977	1005,4
1978	1292,7
1979	1686
1980	887
1981	719,3
1982	588
1983	351,9
1984	502,5
1985	267,5

Pluviómetro 1334
La Lucha

Año	Lámina de lluvia anual (mm)
1966	1498,8
1967	613,5
1968	649,2
1969	1395,1
1970	1168,9
1971	746,8
1972	1437,5
1973	1372,8
1974	873,4
1975	778,1
1976	691,4
1977	1507,9
1978	1644,7
1979	2377
1980	972,6
1981	1015,9
1982	1005,2
1983	1175,3
1984	913
1985	927,9

Pluviómetro 1529
El Cobre

Año	Lámina de lluvia anual (mm)
1966	1744,1
1967	551,2
1968	664,6
1969	1062,7
1970	909,8
1971	577,7
1972	957,5
1973	1258,7
1974	635,9
1975	499
1976	513,5
1977	1085,7
1978	1290,6
1979	2099
1980	1045
1981	996
1982	1084,5
1983	1013,3
1984	813,9
1985	644,6

1986	587,5
1987	807,5
1988	911,9
1989	828,7
1990	938,7
1991	1224,6
1992	773,7
1993	1351,7
1994	1046,7
1995	1102,4
1996	779
1997	782,9
1998	873
1999	1021,9
2000	674,1
2001	870,4
2002	934,3
2003	886,0
2004	583,6
2005	1318,9
2006	1173,5
2007	1563,0
2008	905,1
2009	847,0
2010	1219,3

1986	1476,6
1987	1337,8
1988	1478,2
1989	1097,4
1990	1337
1991	1310,6
1992	1095,7
1993	1827,4
1994	828,2
1995	1087,6
1996	1415,8
1997	1201,4
1998	1387
1999	1447
2000	1166
2001	1404,5
2002	1412
2003	1233,4
2004	825,5
2005	1407,4
2006	1402,8
2007	2431,0
2008	1185,4
2009	579,0
2010	951,6

1986	1136,7
1987	1396,9
1988	1307,9
1989	768,8
1990	597,9
1991	1043,9
1992	599,9
1993	1073,2
1994	439,6
1995	745,3
1996	903
1997	1235
1998	1370,9
1999	1438,8
2000	913,5
2001	1290
2002	1183,5
2003	1153,1
2004	804,6
2005	1394,6
2006	1531,9
2007	2096,5
2008	1252,4
2009	751,2
2010	1532,5

2011	940,0
2012	956,0
2013	742,4
2014	820,0

Tabla. A

2011	1118,1
2012	1213,7
2013	912,7
2014	1113,5

Tabla. B

2011	1234,8
2012	1219,6
2013	1022,5
2014	904,5

Tabla .C

2.3.4 Análisis estadístico de la homogeneidad de las series de datos de lámina de lluvia anual de las estaciones pluviométricas

Los resultados de las pruebas realizadas son los siguientes:

- Serie de lluvia media del Pluviómetro 1331 (Parada): La serie es homogénea con buena auto correlación.
- Serie de lluvia media del Pluviómetro 1334 (La Lucha): La serie es homogénea con buena auto correlación.
- Serie de lluvia media del Pluviómetro 1529 (El Cobre): La serie es homogénea con buena auto correlación

Análisis del resultado: La lluvia media por el método Aritmético es de 1030,62 mm.

2.4 Métodos para obtener el escurrimiento superficial

En la tarea de los cálculos hidrológicos, además de la determinación del valor medio hiperanual del escurrimiento, está comprendida también la evaluación de sus posibles oscilaciones durante todo el período de explotación de las obras hidráulicas. La evaluación de las oscilaciones del escurrimiento anual respecto a su valor medio, se realiza mediante el coeficiente de variación del escurrimiento. Para el aprovechamiento hidráulico de los ríos es preciso tener conocimientos no sólo sobre el escurrimiento medio, sino también sobre los valores del escurrimiento en años de poca y media acuosidad de diferentes probabilidades.

Existen diversas metodologías para determinar el coeficiente de variación del escurrimiento, cuando no existen observaciones. Estas formulaciones han sido propuestas por Riazanov (1973), Fundora (1989), así como Nadir (1990). Por otra parte, Batista (1982) presenta un artículo sobre la variabilidad del escurrimiento para la isla de Cuba.

-Metodología: En el cálculo del escurrimiento medio hiperanual se utilizó la fórmula empírica recomendada por el Ing. J. L. Batista: Segunda variante (1982), es una de las más utilizadas en la zona oriental, obteniéndose la variable normalizada de la precipitación que se ajusta para períodos de estiaje y de corrientes permanentes, también existen las expresiones por regiones en la isla. La fórmula es la siguiente:

$$Uo(Yo) = f[0.879 * U1(Po)]$$

Yo: lámina del escurrimiento medio hiperanual (*mm*).

Uo (Yo); U1 (Po)): son variables normalizadas del escurrimiento y la lluvia. Se obtienen por gráficos y tablas.

El error promedio cuadrático del cálculo según datos del método es de $\pm 15\%$.

Con el valor de la lluvia P_O entramos a la tabla (ver anexo 1) y se busca el valor de U_1 para la región Oriental.

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

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

$$Wo = \frac{Yo * Ac}{1000}$$

Sustituyendo el valor de escurrimiento obtenido en la ecuación y obtiene el valor deQ_0:

$$Qo = \frac{Wo}{31{,}54}$$

El módulo de escurrimiento se obtiene mediante la ecuación:

$$Mo = \frac{Qo * 1000}{Ac}$$

El valor de Cv se obtuvo por la expresión de Riazonov:

$$Cv = 0{,}95 - 0{,}36 * logMo$$

Resultados obtenidos: Se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Precipitación y escurrimiento medio de la cuenca hidrográfica “El Cobre”

Cuenca	Lluvia media(mm)	Yo(mm)	Qo(m^3/s)	Wo (hm^3)	Mo(L/s·km^2)	Cv
El Cobre	**1030,62**	**190,245**	**12,405**	**0,393**	**6,028**	**0,59**

2.5 Temperatura

En sentido general, podemos señalar que el territorio se caracteriza por presentar un clima con predominio de condiciones tropicales marítimas (Köeppen), 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. El régimen de temperaturas se caracteriza por alcanzar un valor medio anual de 25,1 ºC. Las mínimas medias se registran durante los meses de enero y febrero (20,4 y 20,5 ºC respectivamente) y las máximas medias durante julio-agosto con 33,9 y 34,0 ºC. Esto se encuentra reflejado en la siguiente tabla donde muestra la temperatura media en los últimos 5 años que tiende a variar mucho debido a la influencia del cambio climático (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Temperatura media en los últimos 5 años.

	Temp.media (°C)				
Años	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**
Enero	25.8	25.2	25.9	25.2	24.8
Febrero	25.8	26.3	25.0	24.9	25.7
Marzo	25.2	26.8	26.7	26.3	25.4
Abril	27.4	27.4	27.4	26.8	26.1
Mayo	28.4	28.4	27.5	27.4	27.0
Junio	28.4	28.5	28.6	28.4	28.5
Julio	28.3	28.6	29.3	28.5	28.8
Agosto	28.6	28.7	29.3	28.7	29.5

Septiembre	28.3	27.3	29.2	28.7	28.4
Octubre	28.1	27.6	27.9	27.6	27.6
Noviembre	27.0	26.1	27.2	26.1	26.5
Diciembre	26.3	26.4	27.0	26.4	25.5

2.6 Humedad relativa

La humedad relativa, debe su comportamiento a las características específicas del territorio, al régimen de precipitaciones, así como a la influencia marítima, por lo cual podemos decir esta variable climática es alta durante todo el año fundamentalmente en el período lluvioso.

En el periodo estudiado (2014-2018) se obtuvieron valores promedios anuales que oscilaron entre 66 y 78%, y por meses entre 67 y 80% como se muestra en la siguiente tabla 2.5.

Tabla 2.5. Humedad relativa en los últimos 5 años

	Humedad Relativa (%)				
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

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. MODELACIÓN ESPACIAL DE LAS VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS

3.1 Introducción

Este capítulo tiene como premisa fundamental evaluar el comportamiento y la modelación de las variables hidroclimáticas más influyentes en el área de estudio partiendo de los valores de medición obtenido a lo largo de la investigación.

3.2 Modelos espaciales de las variables hidroclimáticas

Los modelos espaciales de las variables hidroclimáticas permiten analizar e identificar el comportamiento espacial de las mismas, lo cual posibilita hacer una evaluación espacial de la zona de estudio; los modelos se realizaron para las variables precipitación y escurrimiento superficial. A continuación, en la (Figura 3.1) se muestra una representación esquemática del vínculo entre la modelación hidrológica y los SIG

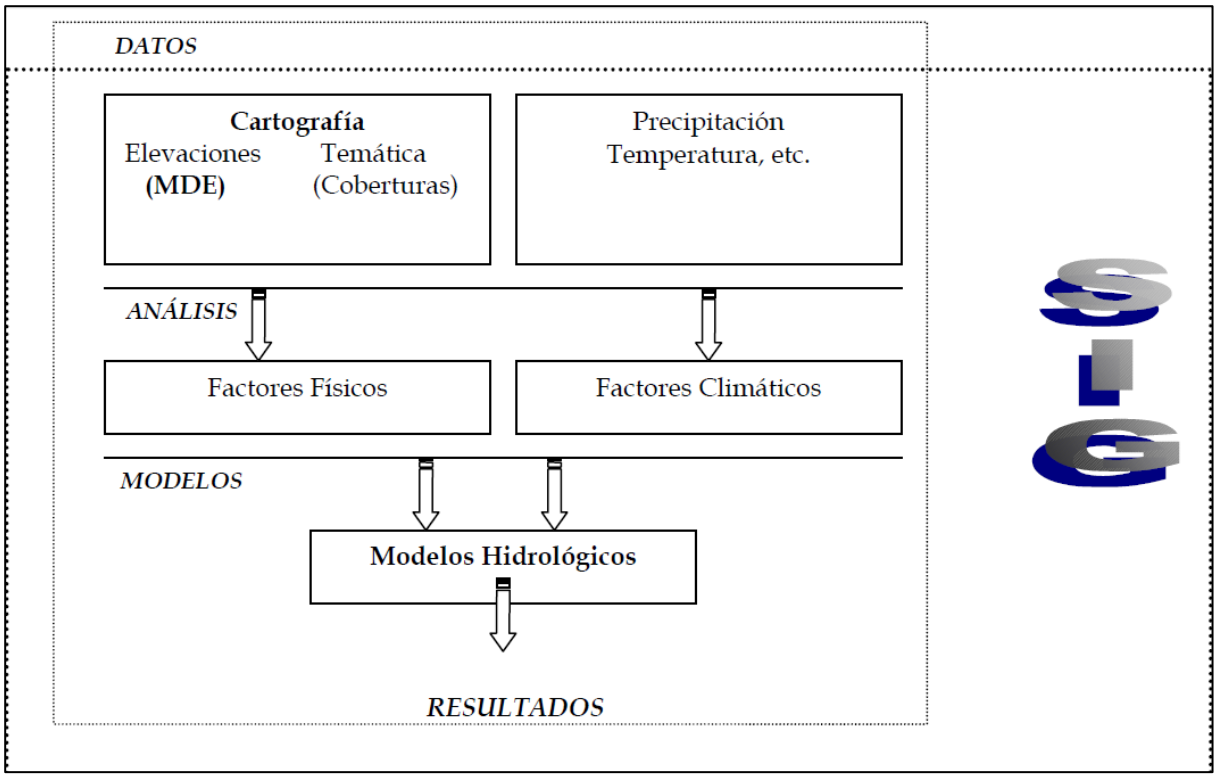


Fig.3.1 Representación esquemática del vínculo entre la modelación hidrológica y los SIG (Olaya, 2004).

3.2.1 Modelo del relieve

Este modelo se diseñó, a partir del modelo Oriental a escala 1: 25 000, donde se encuentran representadas las curvas de nivel de todo el territorio. Este modelo muestra lo abrupta de la topografía en testa zona (Figura 3.2), lo que determina un comportamiento específico de las variables hidroclimáticas en el área de estudio.

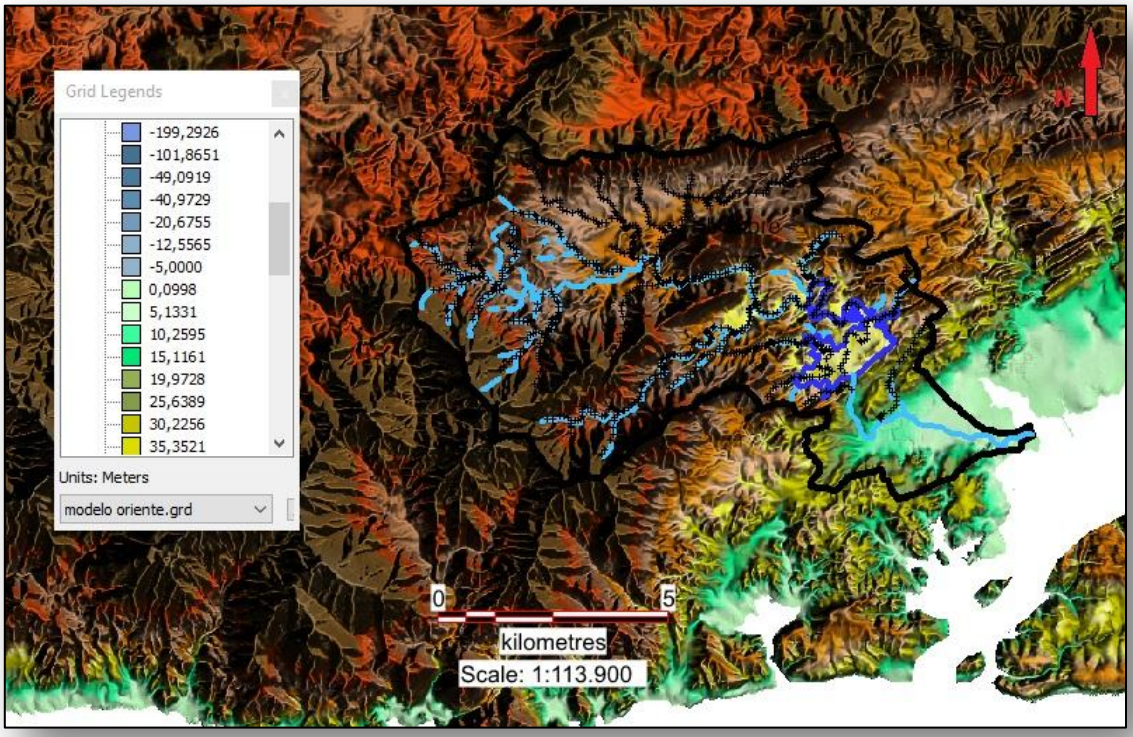


Figura 3.2. Relieve montañoso predominante en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia del autor.

3.2.2 Modelo del tipo de vegetación y suelo

Este modelo se diseñó partiendo de las características del terreno descritas en el capítulo 2. El mismo muestra el comportamiento espacial de la vegetación y el tipo de suelo (Figura 3.3). Además esta representación espacial sirve de base para realizar la modelación del coeficiente de escurrimiento, ya que este depende de las características de estos parámetros. Como se puede observar en el modelo predominan los bosques y arbustos.

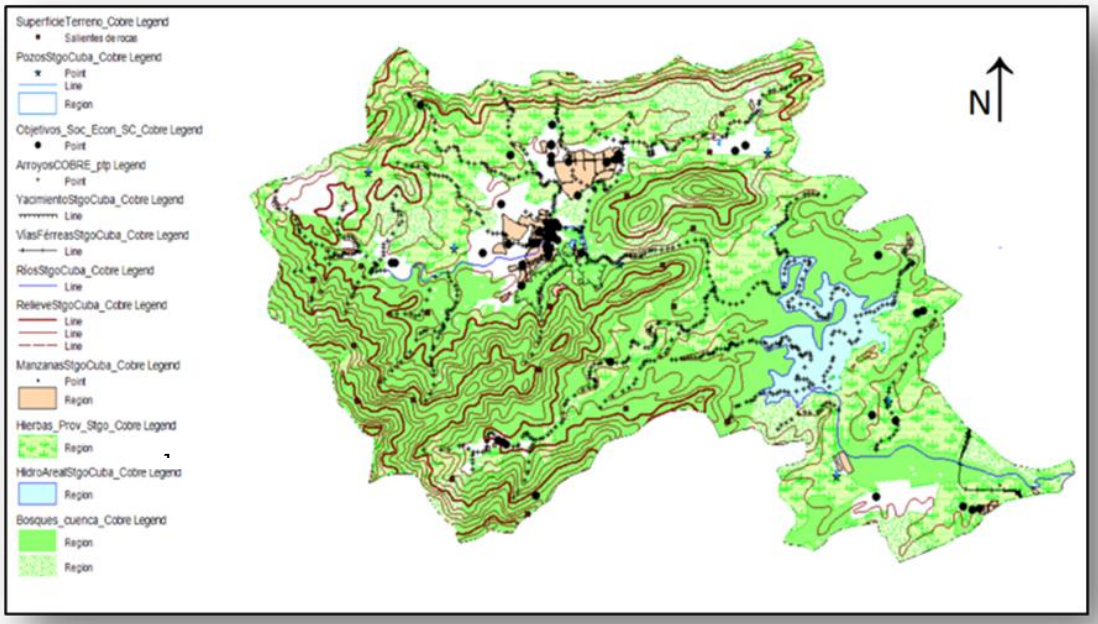


Figura 3.3. Mapa de suelo de la cuenca hidrográfica El Cobre. Fuente: Elaboración propia del autor.

3.2.3 Modelos espaciales de la precipitación

En la zona de estudio partiendo de las informaciones obtenidas se ubicaron en el área cuatro estaciones pluviométricas, pero se tuvieron en cuenta solo 3 de ellas para obtener la precipitación media en la cuenca hidrográfica, porque la estación del Hospital Ambrosio Grillo está cerrada, por estas razones se utilizó el mapa isoyético nacional (1961-2000) (Figura 3.4), para ajustar esta falta de información, el comportamiento espacial de las precipitaciones en la zona de estudio se muestra en la figura 3.5, mostrando que los mayores valores de precipitación se encuentran en la parte alta de la cuenca.

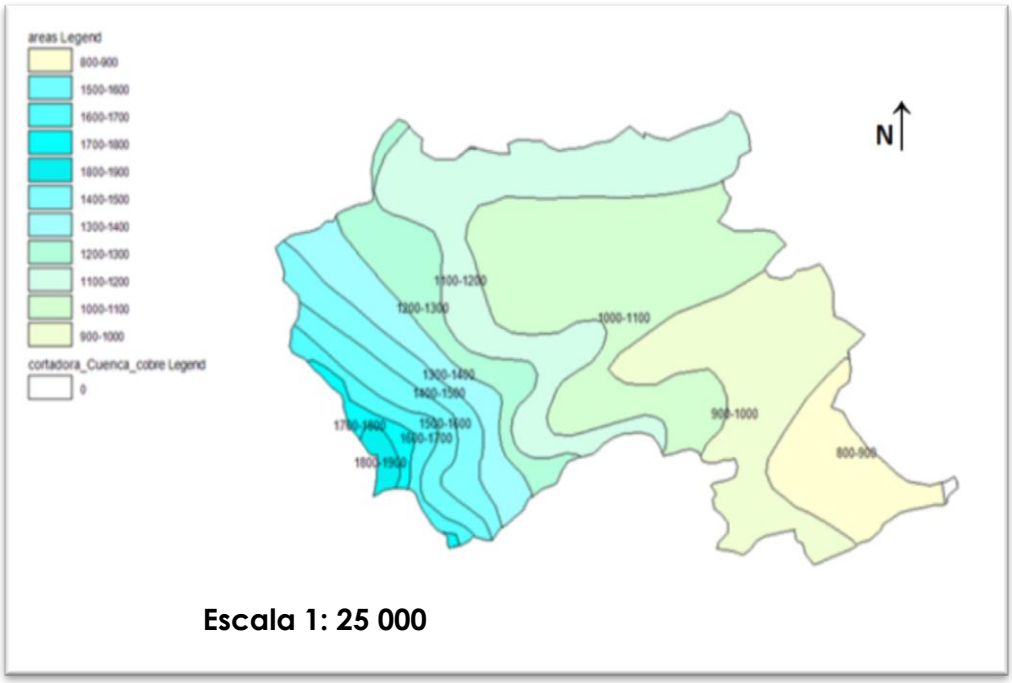


Figura 3.4. Lluvia media anual obtenida del mapa isoyético nacional (1961-2000) en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia del autor.

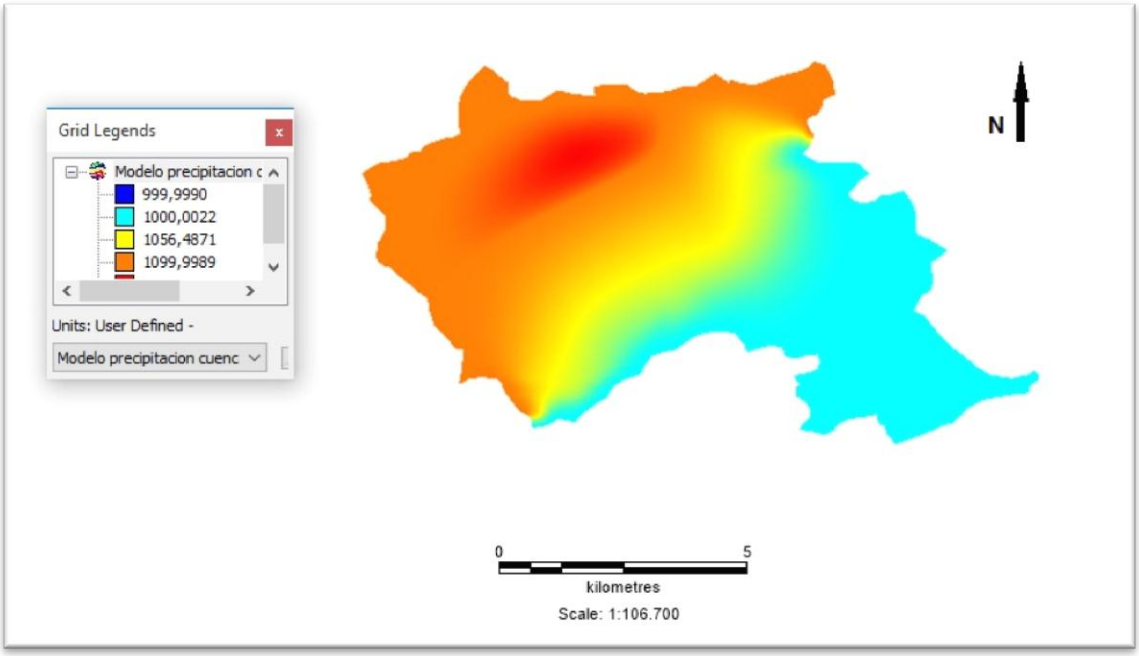


Figura 3.5. Distribución geográfica de la precipitación media anual de la cuenca hidrográfica El Cobre, para el periodo 1966-2014. Fuente: Elaboración propia del autor.

La temperatura y la humedad relativa están estrechamente vinculadas a la precipitación puesto que de ello depende la intensidad de las precipitaciones en el área, puesto que la temperatura varía de igual modo que lo hacen las precipitaciones, por ello a la hora de modelar la precipitación esta se toma en cuenta.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. La variabilidad hidroclimática se debe a los efectos de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero que actualmente son las más altas de la historia, pero también a otras actuaciones del hombre que impactan tanto en el clima como en la naturaleza (cambios de usos del suelo como intensivas reforestaciones y urbanizaciones; construcción de grandes infraestructuras hidráulicas como presas, entre otras).
2. El análisis detallado de las fuentes bibliográficas permitió, analizar, evaluar y caracterizar las variables hidroclimáticas que intervienen en la zona de estudio, así como poner en evidencia la metodología de estudio.
3. Se obtuvieron los resultados necesarios para la modelación de las variables, con una precipitación media de 1030,62 mm y volumen de escurrimiento medio de 0,393 hm^3, lamina media hiperanual de 190,245 mm, módulo de escurrimiento de 0,59 $L/s \cdot km^2$ y un coeficiente de variación por la ecuación de Riazanov de 0,59.
4. Se realizaron utilizando el MAPINFO los modelos digitales de la precipitación y el escurrimiento los cuales permitieron evaluar y caracterizar el comportamiento espacial de los mismos en la zona de estudio.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Ubicar en el área de estudio más estaciones pluviométricas para un mejor análisis espacial de las precipitaciones y ubicar equipos de medición de temperatura y humedad relativa.
2. Hacer el monitoreo de estas variables y actualizar todos los años los modelos espaciales para controlar el comportamiento de estas variables.
3. Que los especialistas el CEMZOC utilicen los resultados de esta investigación en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo en esta cuenca hidrográfica.

BIBLIOGRAFIAS

BIBLIOGRAFÍA

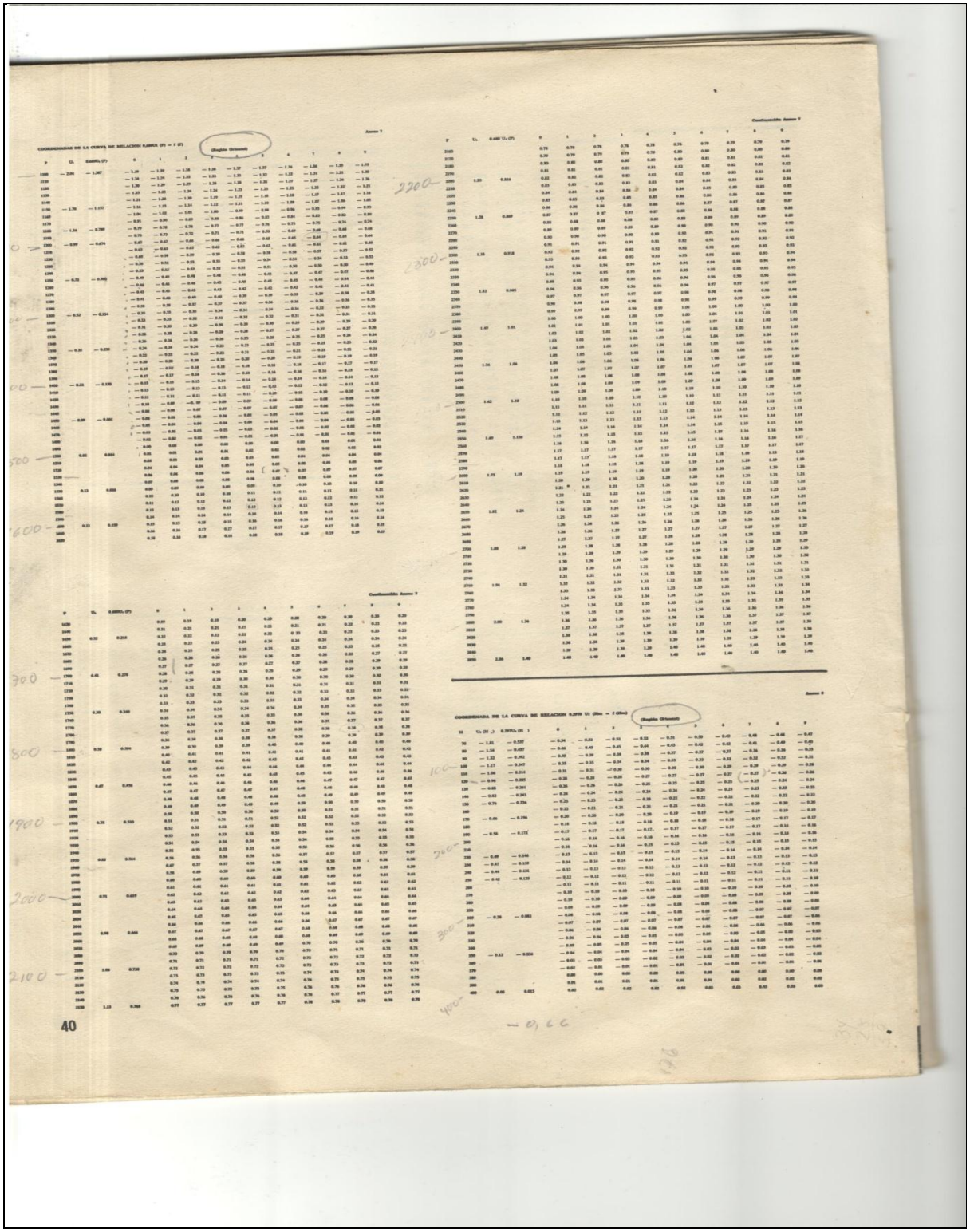
1. Duran, Teresa: *Actualización del potencial hídrico de la provincia Santiago de Cuba. Revista Voluntad Hidráulica*. La Habana. Julio-septiembre,2017/No.121/ISBN 0505-9461
2. Agustín y Marcos Antonio Jacobo*: Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*, *Ed.* en formato electrónico, en la Coordinación General de Vinculación y Desarrollo Institucional de la Rectoría General de la Universidad Autónoma Metropolitana, Tlalpan, D.F. México,2006.
3. Cabezas Calvo-Rubio, F.; Estrada Lorenzo, F. y Estrela Montreal, T., 1999. *Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España*. Ingeniería Civil, 115, 79-96.
4. CAMPOS A., D. F. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico (Tomo I y II). Editorial Universitaria Félix Varela, Ciudad de la Habana.
5. Campos Aranda: *Proceso del ciclo hidrológico, Ed*. San Luis Potosí, S.L.P, México, 1983.
6. Castro Ruz, Fidel (1992). “*Discurso pronunciado en la Cumbre Mundial de Medioambiente”*, Río de Janeiro. Brasil.
7. Del Rio, Miguel Alberto: *Acciones para el manejo integrado de aguas residuales oleosas y aceites usados dirigidas a eventuar su incidencia negativa en la cuenca hidrográfica de la bahía Santiago de Cuba*, Tesis de Maestría en Manejo Integrado de Zonas Costeras, Tutor: DrC. José Abelardo Planas Fajardo, Centro de Estudios Multidisciplinarios de Zonas Costeras, Santiago de Cuba ,2013.
8. Giraldo Osorio, J. D., 2011. *Análisis de la variabilidad y tendencias de eventos extremos de precipitación en el contexto del cambio climático: desarrollo de una herramienta de seguimiento dinámico de inundaciones*. *Tesis*. Universidad Politécnica de Cartagena, España.
9. González,Virginia:*Propuesta del Plan de Manejo Integrado de la UCAPMI Cuenca Parada en Santiago de Cuba,*Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Manejo Integrado de Zonas Costeras,Tutora: Dra. Celene Milanés

Batista, CENTRO DE ESTUDIOS MULTIDISCIPLINARIOS DEZONAS COSTERAS (CEMZOC), Santiago de Cuba, 2015.

10. Hierrezuelo Pérez, Rolando. *Metodología para la determinación del escurrimiento medio anual de una cuenca.* Santiago de Cuba, junio 2016.
11. Lilian, Norberto, María del Carmen y Bienvenido Martínez, José: *Temas de hidrología superficial para ingenieros, Ed.* Félix Varela, La Habana, 2007.
12. Linsley, Kohler y Paulus: Hidrología para Ingenieros, *Ed*. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá, Colombia, 1977.
13. Maceo, Delvis Ángel: *Modelación espacial de las variables hidroclimáticas que intervienen en el fenómeno de la humedad por capilaridad en la zona litoral del Centro Histórico de Santiago de Cuba*, Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Tutor: MSc. Ing. Mayelin González Trujillo, UNIVERSIDAD DE ORIENTE, Santiago de Cuba, junio, 2016.
14. Manejo y protección de cuencas hidrográficas en América Latina (Reseña Bibliográfica). Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Centro de Hidrología y calidad de las aguas. Ciudad de La Habana, 1998.
15. Manual de Manejo de cuencas. Word Vision. Canadá: Colectivos de autores 31. Martínez, L., Estudio Preliminar de la calidad de las aguas del río Gascón, 1996.
16. Olaya, Víctor: *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno, Ed.0.95, enero, 2004*.
17. Olmos, Patricia: Evaluación de la variabilidad hidroclimática desde modelos climáticos regionales a escala de cuenca, Tesis Doctoral, Tutor: Sandra G. García Galiano, Universidad Politécnica de Cartagena, Unidad Pre departamental de Ingeniería Civil, España, 2015.
18. Perrand Robert G. *Propuesta de una Estrategia Ambiental para el Manejo Integrado de la Cuenca San Juan, bajo un enfoque de integración al medio marino*. Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en Manejo Integrado de Zonas Costeras. Universidad de Oriente. 2008.
19. Piedra, J. I. G. (2007). *Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de Manejo,* (inédito). C. Habana, Cuba.

20. Tapia, Juan Diego: *Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de un gradiente longitudinal*, Tesis previa a la obtención del grado de Ingeniero Civil, Tutor Juan Diego Tapia Sisalima, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería Civil, Ecuador, Cuenca, marzo, 2016.
21. Ven Te Chow, David y Larry W. Mays: *Hidrología Aplicada*, *Ed.* NOMOS S.A, Colombia, 2000.
22. Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill
23. Villon, Máximo: *Hidrología, Ed*. Villon, Lima, Peru,2002

ANEXOS



ANEXO.1

la norma del escurrimiento en la región central.

Pero es necesario tener en cuenta que el error indicado de cálculo (± 8.9 %) puede ser garantizado solamente para los ríos cuyas cuencas tengan las condiciones física-geográficas (relieve, carso, hidrología, composición geológica, suelos) análogas o muy cercanas a las condiciones de las cuencas de los ríos tomados para la deducción de la misma fórmula. En los gráficos (18) (19) se ofrecen las relaciones para esta región entre la lámina de escurrimiento, la precipitación y la altura media, respectivamente.

Los gráficos de las relaciones entre las variables iniciales y las variables normalizadas. así como sus tablas de coordenadas se exponen en el trabajo.

3. *Región Oriental*

En la provincia de Oriente se observan diferentes condiciones climáticas y física-geográficas. Como consecuencia de esto, son diferentes las condiciones de formación del escurrimiento. Estas diferencias fueron utilizadas para la delimitación de las principales subregiones durante la regionalización hidrológica del territorio (cuenca del río Cauto, norte de Oriente, Baracoa, Guantánamo, vertiente meridional de la Sierra Maestra, Manzanillo-Niquero) [2]. En cada una de estas subregiones, los valores medios hiperanuales de las precipitaciones y su distribución interanual, exposición de pendientes, grado de protección contra los vientos dominantes y las condiciones geológicas e hidrogeológicas, tienen sus particularidades propias para cada una de ellas. Por eso, del cálculo por la fórmula general para la parte oriental de la Isla, no se puede esperar resultados muy precisos.

Este cálculo se ha hecho porque para deducir las fórmulas regionales (para cada una de las 6 subregiones) que hay actualmente, no existen materiales de observaciones suficientes.

La ecuación ofrecida: $h_o = f_o [0.680U_1 (R_o) + 0.297U_2 (H_m)]$ (14) está calculada sobre la base de datos entregados por 26 estaciones hidrométricas (tabla 9).

Caracterizada por el coeficiente de correlación (R_o), su cuadrado (R_o^2), sus errores medios relativos cuadráticos (ER_o . ER_o^2) son iguales a: R_o = = 0.94, R_o^2 0.88, ER_o = 0.023, ER_o^2 0.049, respectivamente.

Comparando las columnas 10-13 de la tabla (10) vemos que el cálculo de la norma del escurrimiento para los ríos de la provincia de Oriente, es mucho mejor, realizado por la fórmula (14) donde el error medio de cálculo es ± 13.5 % contra ± ±18.8 (por la fórmula (5) y ± 18.2 y ± 13.1 por los gráficos de J. L. Batista y D. A. Matakiev, respectivamente.

Del análisis de las estaciones que utilizó Matakiev, en su estudio se llega a la conclusión de que es un trabajo regional para la provincia de Oriente, porque las estaciones observadas, en su mayoría, pertenecen a esta provincia. Por tal razón, el error promedio que resulta de los nomogramas de

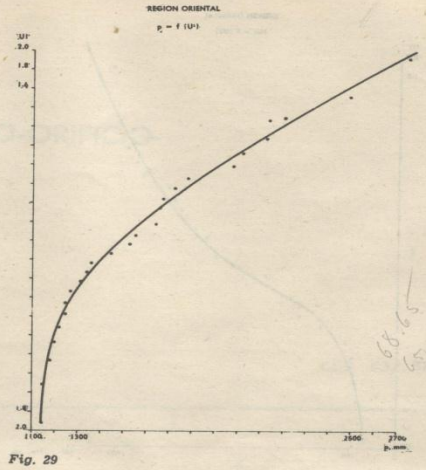


Fig. 29

Matakiev y de la fórmula (14) son prácticamente iguales.

En los gráficos (20) y (21) se ofrecen las relaciones para esta región entre la lámina de escurrimiento, la precipitación y la altura media, respectivamente.

Los gráficos de las relaciones entre las variables iniciales y las variables normalizadas, así como sus tablas de coordenadas se exponen en el trabajo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Basándose en el análisis hecho sobre la posibilidad de utilización de las fórmulas generales (5) y del trabajo (3), en todo el territorio de Cuba, para el cálculo de la norma del escurrimiento, está demostrado que, debido a la compensación de las condiciones de formación del escurrimiento en distintas regiones física-geográficas y climáticas, estas fórmulas dan errores promedios considerables; los errores sistemáticos, son mayores. Los cálculos por la fórmula (5) dan errores promedios de ± 19.0 %, ± 11.4 %, ± 18.8 % y errores sistemáticos de — 18.8 % + 4.4 % y + + 10.5 %, respectivamente, para las regiones Oriental, Central y Occidental. Para estas mismas regiones, por la fórmula del trabajo (3), los errores medios son: ± 28.0 % ± 9.8 % y ± ± 18.8 %, y los errores sistemáticos son): — — 28.0 %, + 6.5 % y + 16.7 % (tabla 4).

Según los datos de la tabla 2 del trabajo [3] para las regiones, Oriental, Central y Occidental, los errores medios, son ± 19.3 %, ± 12.3 % y ± 12.9 %; los sistemáticos, — 17.2 %, 9.4 % y 8.3 % correspondientemente.

45

ANEXO.2