



Universidad de Oriente
Sede "Julio Antonio Mella"
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Hidráulica

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Hidráulico

TEMA: Estimación de variables hidrológicas a partir de las características morfométricas de las cuencas de la provincia Santiago de Cuba utilizando el software STATGRAPHICS.

Autor: José Antonio La O León

Tutores: MSc. Ing. María Teresa Durand Silveira

Ing. Abel Dorta Armaignac

Curso 2019-2020

Santiago de Cuba, 2020

Resumen

Una manera de abordar la predicción de las variables hidrológicas son los estudios de correlación y regresión entre estas variables y las características morfométricas de las cuencas. En particular, esta solución es atractiva para estudios preliminares y que requieran de respuestas rápidas con aceptable grado de confiabilidad y puede ser una herramienta muy útil en manos de los decisores en proyectos de planeamiento, tareas de la Defensa Civil y como referencia en la comparación con otros métodos. El objetivo de este trabajo es obtener modelos estadísticos para la estimación de variables hidrológicas de las cuencas de la provincia Santiago de Cuba a partir de las observaciones existentes y de su correlación con las características morfométricas de las cuencas. Los resultados muestran que existe una muy buena correlación entre el volumen del escurrimiento medio anual y el caudal de escurrimiento medio anual con las variables morfométricas y una adecuada correlación en el caso de la lluvia media anual. También se concluye que la lámina de evaporación media anual y el módulo del escurrimiento medio anual no mostraron buena correlación con las variables morfométricas de las cuencas. Se propone además los modelos estadísticos más adecuados para la estimación de estas variables.

Palabras claves:

Correlación estadística, modelos de regresión, variables hidrológicas, características morfométricas.

Summary

One way to approach the prediction of hydrological variables is the correlation and regression studies between these variables and the morphometric characteristics of the basins. In particular, this solution is attractive for preliminary studies and that require quick responses with an acceptable degree of reliability and can be a very useful tool in the hands of decision-makers in planning projects, Civil Defense tasks and as a reference in comparison with other methods. The objective of this work is to obtain statistical models for the estimation of hydrological variables of the basins of the Santiago de Cuba province from the existing observations and their correlation with the morphometric characteristics of the basins. The results show that there is a very good correlation between the annual mean runoff volume and the annual mean runoff flow with the morphometric variables and an adequate correlation in the case of the annual mean rainfall. It is also concluded that the annual mean evaporation sheet and the mean annual runoff modulus did not show a good correlation with the morphometric variables of the basins. In addition, the most appropriate statistical models for the estimation of these variables are proposed.

Keywords:

Statistical correlation, regression models, hydrological variables, morphometric characteristics.

Índice

Introducción.....	1
Desarrollo	6
1. Generalidades sobre las cuencas hidrográficas	6
1.1 Definición de cuenca hidrográfica.....	6
1.2 Clasificación y características de las cuencas hidrográficas	7
1.3 Características morfométricas de las cuencas hidrográficas.....	8
1.4 Variables hidrológicas	13
2. Métodos estadísticos de correlación y regresión	20
2.1 Software STATGRAPHICS Centurion	21
2.2 Procedimiento estadístico	21
3. Análisis y discusión de los resultados.....	23
Conclusiones.....	29
Recomendaciones	30
Referencias Bibliográficas.....	31

Introducción

En la actualidad la hidrología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los Recursos Hidráulicos, y ha llegado a convertirse en parte fundamental de los proyectos de ingeniería que tienen que ver con suministro de agua, disposición de aguas servidas, drenaje, protección contra la acción de los ríos y recreación. De otro lado, la integración de la hidrología con la Geografía matemática, en especial a través de los sistemas de información geográfica, ha conducido al uso imprescindible del computador en el procesamiento de información existente y en la simulación de ocurrencia de eventos futuros.

En ese sentido, es necesario tener un conocimiento básico de la cuenca hidrográfica, como unidad mínima de gestión, para poder hacer una caracterización y diagnóstico del recurso hídrico, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que sirva de base a los usuarios del recurso y planificadores, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros.

La Cuenca Hidrográfica, es la totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, tales que todo el escurrimiento originado en tal área es descargado a través de una única salida. Cuenca es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal a sus tributarios (Campos Aranda, 1992).

El estudio de las características morfométricas de una cuenca pretende cuantificar determinados rasgos propios de la superficie terrestre. La cuenca hidrográfica funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimiento. Esta transferencia se realiza con pérdidas y es una función bastante compleja de numerosos factores, entre los cuales predomina el clima y la configuración del terreno en el cual se desarrollan los fenómenos hidrológicos.

Los índices y magnitudes físicas de la cuenca que se expresan en términos simples y como los valores medios de ciertas características del terreno, juegan un papel muy importante y son condicionantes de su régimen hidrológico.

Conviene aclarar que, además, recíprocamente, el carácter hidrológico de una cuenca tiende a formar su característica física. Aceptando tal interrelación, se podría pensar en predecir la respuesta hidrológica de una cuenca a partir de ciertos parámetros

físicos fácilmente determinables; esto último constituye una de las aplicaciones más importantes de la geomorfología.

Todas las variables que intervienen en el ciclo hidrológico están fuertemente interrelacionadas e interactúan continuamente. La precipitación, por ejemplo, influye directamente en la formación del escurrimiento y éste a su vez en la magnitud de la infiltración y de la evaporación.

Asimismo, las variables hidrológicas están estrechamente relacionadas con las características geomorfológicas de las cuencas y con las características climáticas de la zona o región geográfica en estudio.

La medición sistemática de las variables relativas al clima como la temperatura ambiental, la humedad relativa, la presión atmosférica, la precipitación, entre otras, es una práctica que data de cientos de años y que persigue la caracterización temporal y espacial del clima de una región y realizar predicciones de su comportamiento futuro dada la conocida influencia que ejerce el clima en todas las actividades humanas.

La red de estaciones climatológicas existente actualmente en Cuba ofrece información para realizar estudios del clima a nivel del país o en zonas relativamente extensas, sin embargo, esta información es insuficiente cuando se requieren estudios locales en áreas más pequeñas, como las cuencas y subcuencas donde frecuentemente se evalúan los proyectos hidráulicos.

Para este último caso se necesita contar con una red de estaciones para la medición de las variables hidrológicas más importantes distribuida en número suficiente por todo el territorio nacional de acuerdo a la variabilidad de estas variables hidrológicas y las características del relieve y del clima entre otros factores importantes a considerar.

Actualmente, la red de estaciones existente administrada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), no satisface ni por su distribución ni por el número de estaciones con el nivel de detalle requerido de la información. Esta situación se agrava cuando se analiza por separado las distintas variables hidrológicas. Por ejemplo, en Santiago de Cuba, de acuerdo a (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, 2020), existen en la provincia 140 pluviómetros, 2 estaciones climatológicas y 2 estaciones hidrométricas. La red de estaciones pluviométricas que es la más numerosa, no está distribuida uniformemente en las zonas altas, donde se trabaja actualmente en su

rediseño con propuestas de estaciones automatizadas y otras soluciones. Es evidente que sólo dos estaciones hidrométricas son insuficientes para caracterizar el escurrimiento de la provincia.

Todo lo anterior ha conllevado a la utilización de los métodos empíricos, casi como única solución, en los estudios hidrológicos. Métodos éstos propuestos para las condiciones de otros países, los cuales no han sido suficientemente estudiados y adaptados para las particularidades de Cuba.

Para obtener resultados satisfactorios al aplicar los métodos empíricos se requiere de profesionales calificados en Hidrología, especialidad que no se estudia en Cuba, y de la cual sólo quedan en activo en el país un muy reducido número de especialistas graduados de la antigua Unión Soviética. El Ingeniero Hidráulico de perfil amplio que se diploma en Cuba actualmente, recibe una formación básica en esta especialidad que no es suficiente y que tiene que ser complementada con estudios de postgrado y años de experiencia en la actividad.

Una manera de abordar la predicción de las variables hidrológicas que atenúa las dificultades expuestas con anterioridad son los análisis de correlación entre las variables hidrológicas y morfométricas de las cuencas. En particular, esta solución es atractiva para estudios preliminares y que requieran de respuestas rápidas con aceptable grado de confiabilidad y puede ser una herramienta muy útil en manos de los decisores en proyectos de planeamiento, tareas de la Defensa Civil y como referencia en la comparación con otros métodos.

Los análisis de correlación pueden ser muy laboriosos, sin embargo, con el avance vertiginoso de la computación en las últimas décadas se han desarrollado potentes softwares estadísticos profesionales con un notable incremento de la capacidad y rapidez de resolución, además, han incorporado rutinas de cálculos mejoradas que amplían las posibilidades de uso de los mismos. Los ambientes de interacción con el usuario se han hecho más amigables y el intercambio de información con otros programas facilita el uso simultáneo de éstos en los análisis.

STATGRAPHICS es un conocido software profesional que ha sido ampliamente utilizado para el análisis estadístico general. Tiene incorporado en sus rutinas de cálculo más de 160 procedimientos estadísticos, los cuales son acompañados con una

característica salida gráfica variada y una ayuda para la interpretación de los resultados, que lo hacen muy atractivo y efectivo para el análisis estadístico de los datos de las variables hidrológicas.

El STATGRAPHICS Centurión XV (versión 15.2.14) está disponible en idioma español y cuenta con asistentes que guían al usuario en los análisis estadísticos más comunes, tales como: la estadística descriptiva de los datos de una muestra, la comparación de muestras, el análisis multivariado de datos y su correlación, el análisis de regresión, el análisis de los atributos y capacidades de procesos y el diseño de experimentos, entre otros.

Considerando que STATGRAPHICS Centurión XV cuenta con las herramientas estadísticas requeridas para los análisis que se llevarán a cabo en este trabajo y que se tiene acceso a la licencia del mismo se justifica su uso en la presente investigación.

Problema de investigación:

¿Cómo estimar las variables hidrológicas de forma rápida y con aceptable grado de confiabilidad para el aprovechamiento de los recursos hídricos en la provincia de Santiago de Cuba?

Objeto: Estimación de las variables hidrológicas.

Objetivo General:

Obtener modelos estadísticos para la estimación de variables hidrológicas de las cuencas de la provincia Santiago de Cuba a partir de las observaciones existentes y de su correlación con las características morfométricas de las cuencas.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar el estado del arte de los métodos de estimación de las variables hidrológicas haciendo énfasis en los métodos de correlación estadística.
- Recopilar, actualizar y procesar la información existente de las características morfométricas y de las variables hidrológicas de las cuencas hidrográficas de la provincia de Santiago de Cuba.
- Aplicar el método de correlación estadística considerando las características morfométricas de las cuencas en estudio para obtener las relaciones funcionales a utilizar en los modelos de estimación de las variables hidrológicas.

Campo de Acción:

Método de correlación estadística para la estimación de las variables hidrológicas a partir de las características morfométricas de las cuencas.

Hipótesis

La obtención de un modelo estadístico para la estimación de las variables hidrológicas contribuye al aprovechamiento racional de los recursos hídricos y constituye una herramienta eficaz para la toma de decisiones.

Desarrollo

1. Generalidades sobre las cuencas hidrográficas

1.1 Definición de cuenca hidrográfica

Podemos acercarnos primariamente al concepto de cuenca hidrográfica desde una perspectiva eminentemente hidrológica, definiendo que es el lugar o espacio físico-geográfico donde por sus características, se capta, almacena, escurre, infiltra y se evapora el agua proveniente de las precipitaciones, formando las redes interconectadas de pequeñas corrientes, arroyos, ríos, permanentes o intermitentes, comúnmente denominada red hidrográfica, que en la mayoría de las ocasiones desemboca en el mar. En su desarrollo, el concepto de cuenca hidrográfica se fue inicialmente apropiando de una visión hidrológica desde sus orígenes y por su uso, le daba predominio y casi exclusividad a las aguas superficiales y a la red hidrográfica, en detrimento de las complejas y variadas interacciones entre el escurrimiento superficial, la recarga y la infiltración de las aguas, las que alimentan y forman los recursos subterráneos.

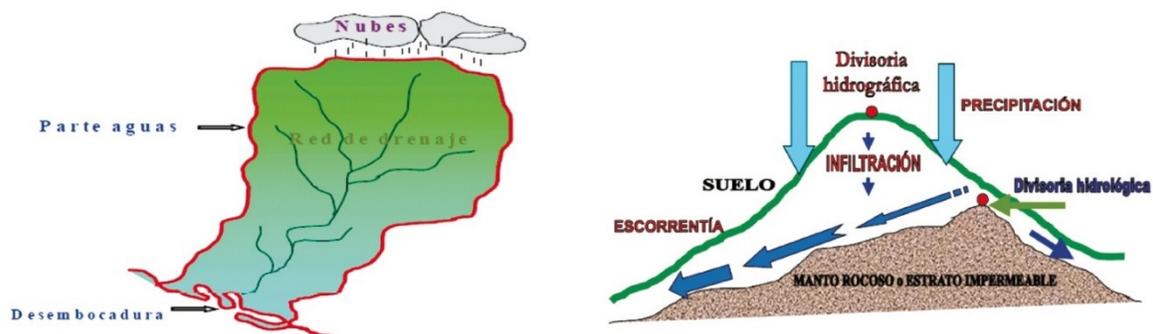


Figura 1. La cuenca hidrográfica incluyendo las aguas subterráneas (García Fernández & Gutiérrez Díaz, 2015)

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto se puede decir que cuenca es el área geográfica delimitada por la divisoria de las aguas que conforman un sistema hídrico constituido por aguas superficiales y subterráneas, que las conduce a un río principal, lago, zona de infiltración o costas como se puede observar en la figura 1. Los límites de la división de las aguas superficiales y subterráneas no siempre coinciden, por lo que pueden ser extendidos hasta incluir los acuíferos o tramos subterráneos,

cuyas aguas confluyen hacia la cuenca en cuestión, de importancia a los efectos de realizar el balance hidrológico (García Fernández & Gutiérrez Díaz, 2015).

1.2 Clasificación y características de las cuencas hidrográficas

Las partes en que usualmente se divide una cuenca hidrográfica son (Figura 2):

- **Cuenca alta**, que corresponde a la zona donde nace el río, el cual se desplaza generalmente por una gran pendiente. También denominada zona de cabecera.
- **Cuenca media**, la parte de la cuenca en la cual hay un cierto equilibrio entre el material sólido que llega por la corriente y el que continúa transitando. También llamada zona de captación-transporte.
- **Cuenca baja**, en la cual los arrastres de la parte alta y media generalmente se depositan. También conocida como zona de emisión.

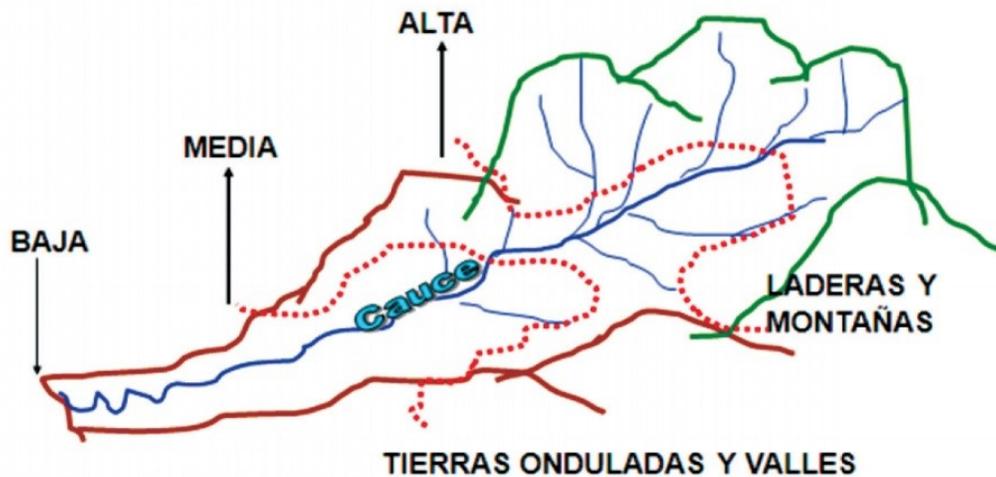


Figura 2. Cuenca hidrográfica desde su parte alta a la baja. Fuente (García Fernández & Gutiérrez Díaz, 2015)

En la numerosa literatura internacional sobre el tema, pueden encontrarse clasificaciones de cuencas relacionadas con el lugar donde descargan finalmente las aguas:

Exorreicas: cuando drenan sus aguas al mar o al océano.

Endorreicas: desembocan en lagos o lagunas, que no tienen comunicación fluvial al mar. Pueden ser también, en cuevas y sumideros, como ocurre en Cuba.

Arreicas: las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje.

1.3 Características morfométricas de las cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas cuentan con muchas características morfométricas dependiendo principalmente de las características físicas y del relieve de la zona geográfica en que se encuentren. Algunas de ellas son el área, la longitud del río, la densidad de drenaje, la pendiente del río, la pendiente de la cuenca, la alturas media, máxima y mínima, entre otros.

Área de la cuenca (km²): Una cuenca tiene su superficie perfectamente definida por su contorno y viene a ser el área drenada comprendida desde la línea divisoria de las aguas, hasta el punto convenido de cierre, sea una estación hidrométrica, la desembocadura u otra. Para la determinación del área de la cuenca es necesario previamente delimitar la cuenca.

Pendiente media de la cuenca.

Se determina por la siguiente fórmula:

$$S_c = \frac{\Delta H \sum_{i=1}^n l_i}{A}$$

donde:

ΔH : Equidistancia entre curvas de nivel (m)

$\sum_{i=1}^n l_i$: Longitud total de las curvas de nivel en la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

S_c : Pendiente media de la cuenca (%)

n: Cantidad de curvas de nivel en la cuenca

Las longitudes de las curvas de nivel se miden con el compás de punta seca, con una abertura no menor de 2 mm, afectándolo sólo por la escala del mapa topográfico.

La fórmula desarrollada se utiliza cuándo las equidistancias no son iguales, como sucede generalmente en cualquier cuenca en estudio. Esta se expresa como:

$$S_c = \frac{\Delta H_1 l_1 + \Delta H_2 l_2 + \Delta H_n l_n}{A}$$

Alturas media, máxima y mínima de la cuenca.

La altura máxima de la cuenca es la mayor cota de la cuenca y la mínima la menor cota, respectivamente; mientras que la altura media de la cuenca puede ser determinada por la expresión:

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^m A_i H_i}{\sum_{i=1}^m A_i}$$

A_i : Área entre curvas de nivel (km^2)

H_i : Altura media entre curvas de nivel contiguas (m)

H_m : Altura media de la cuenca (m)

Longitud del río

La medición de la longitud del río se realiza en el mapa topográfico, mientras mayor sea la escala mucho mejor. Se comienza la medición por la desembocadura o cierre de cálculo por ser un punto de más fácil determinación que el nacimiento, utilizando para ello un compás de punta seca. Los resultados de la medición pueden ser afectados por los siguientes factores: magnitud de la escala escogida, la sinuosidad y la magnitud del arco del compás.

La influencia de la magnitud del arco del compás y la sinuosidad del río en el resultado de las mediciones se calcula dividiendo el río en tramos según su sinuosidad. Cada tramo se mide con un arco de compás diferente y se comprueba la medición realizándola de atrás hacia delante y viceversa, si el error en la medición es menor del 2%, entonces está correcta. En un sistema de coordenadas se trazan, por el eje de las abscisas, las magnitudes diferentes del arco del compás utilizada para medir un tramo y en las ordenadas, la longitud de la medida correspondiente a cada abertura del compás. La curva obtenida se prolonga hasta cortar el eje de las ordenadas, con el cual se obtiene la longitud del tramo como si fuera medida con el compás cerrado.

Otra forma de obtener la longitud del río es a través del coeficiente de sinuosidad (k_s) mediante modelos. Así se obtiene la longitud del río por la fórmula:

$$L = L' K_s$$

Siendo:

L' : Longitud medida con el compás de punta seca con una abertura de 2 mm .

K_s : Se obtiene por comparación visual del tramo con los modelos de tipos de sinuosidades.

L : Longitud real.

El software DIGITAL, que se encuentra en las direcciones provinciales del INRH, permite calcular L directamente, sin tener que aplicar coeficiente alguno.

Pendiente del río principal

La pendiente de un río se puede determinar de diferentes formas:

Utilizando el concepto de pendiente media. La pendiente media es la diferencia de nivel del cauce de agua para una longitud unitaria. En el caso de la pendiente del río, para toda su longitud será:

$$S_m = \frac{\Delta H}{L}$$

ΔH : Diferencia de altura entre origen y desembocadura o cierre (m).

L : Longitud total del río (km).

S_m : Pendiente media del río (‰).

Densidad de drenaje

Se calcula dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total que las contiene:

Dónde:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

L : Σ longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en km.

A : superficie de la cuenca en km^2

Este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca.

Como punto de partida de lo anteriormente expuesto y apoyándonos en los estudios sustanciales de los autores Nancis Mora y Durand (Durand.M.T., 2017), en la tabla 1 se muestran las principales características morfométricas de las cuencas hidrográficas en estudio.

Del análisis de la información mostrada en la tabla 1, se puede observar que existen 54 cuencas formadas por ríos principales con áreas entre 1.8 y mayores de 2000 km², de ellas, 3 son de interés nacional: Cauto, Mayarí y Guantánamo; y 2 de interés provincial: San Juan y Baconao. De acuerdo a su área se agrupan de la siguiente manera:

- menores de 100 ----- 49 cuencas
- De 101 - 300 ----- 2
- De 301 – 800 ----- 2
- Mayor de 2000 ----- 1

Tabla 1. Principales características morfométricas (Durand.M.T., 2017)

No	Cuencas	Coordenadas N E	Ac (km ²)	Hm (m)	Yc (o/oo)	Yr (o/oo)	Dd (km/km ²)	Lr (km)	H1 (m)	H2 (m)	Clasif
1	El Macho	137.2 481.2	14	467	423	103.4	0.94	8.7	900	0	P
2	La Magdalena-G	138.3 487.0	56.3	543	360	47.5	0.95	18.9	900	0	P
3	La Plata	140.6 493.3	57.9	574	482	60.6	1.20	18.8	1140	0	P
4	Palma Mocha	142.1 495.4	34.5	802	572	140.3	1.10	13.4	1880	0	P
5	Las Cuevas	143.0 496.8	7.89	738	615	203.7	1.12	5.9	1200	0	I
6	Potrillo	142.2 501.4	14.7	802	550	189.5	1.75	9.5	1800	0	P
7	Ocuja	142.6 503.7	3.83	591	446	234	2.18	5	1320	0	P
8	Turquino	143.8 507.9	113	795	578	63.3	1.25	22.1	1400	0	P
9	La Bruja	143.7 511.1	13.1	606	568	151.2	1.39	8.2	1240	0	I
10	Peladero	145.0 516.1	85.1	985	486	60.3	1.24	25.2	1520	0	P
11	Las Agujas	145.2 518.0	1.8	520	412	224	2.7	5	1120	0	I
12	Avispero-G	144.3 523.3	9.49	748	612	200	1.29	6.5	1300	0	I
13	Uvero	143.6 527.0	24	862	496	148.1	1.11	10.8	1600	0	P
14	Las Bijas	144.2 528.7	12.1	505	413	176.6	0.94	7.7	1360	0	P
15	Bayamita	144.2 533.2	61.4	778	498	87.9	1.03	18.2	1600	0	P
16	Río Grande	144.5 535.8	25	611	473	123.3	0.54	12	1480	0	P
17	Papayo	145.5 538.8	11	330	349	139.4	0.71	6.6	920	0	P
18	Guamá	145.6 542.0	83	591	484	41.8	0.97	24.9	1040	0	P
19	Las Calabazas	146.4 544.4	8.4	310	236	104	0.85	5.0	520	0	I
20	El Tabacal	146.0 548.5	2.8	120	115	107	2.1	3.0	320	0	I
21	Sevilla	146.4 522.1	83.3	422	421	50.8	0.86	18.5	940	0	P
22	Quebra Seca	146.5 553.2	12.1	233	258	65.0	0.77	8.0	520	0	I
23	El Macío G	152.1 609.5	24.4	192	279	36.8	1.34	12	440	15	P
24	Seco	149.05 560.5	25.1	321	379	78.0	0.57	8.2	640	0	P
25	Tengua	149.3 563.9	8.5	330	279	113	0.90	6.2	700	0	I
26	La Trampa	149.0 565.3	8.9	360	340	124	0.95	5.0	620	0	P
27	Quiviján	148.7 566.8	9.2	289	360	114.7	0.66	6.1	700	0	P
28	Masandi	148.1 569.8	6.7	146	224	96.1	1.17	5.2	500	0	P
29	Aserradero	148.6 572.1	7.8	333	427	142.8	1.73	19.9	700	0	I
30	Cojímar	146.6 576.4	29	378	395	48.5	0.71	10.7	520	0	P
31	Boca Dos Ríos	146.5 578.0	15.5	439	416	95.2	0.60	8.4	800	0	P

No	Cuencas	Coordenadas		Ac	Hm	Yc	Yr	Dd	Lr	H1	H2	Clasif
		N	E	(km ²)	(m)	(o/oo)	(o/oo)	(km/km ²)	(km)	(m)	(m)	
32	Cañizo	145.9	583.3	9.2	398	460	142.8	0.73	5.6	800	0	P
33	Nima Nima	145.7	588.7	20.6	326	402	70.6	0.92	8.5	600	0	P
34	Rancho Cruz	145.8	592.3	1.8	200	190	40	0.90	3.0	120	0	I
35	Río Seco	146.0	593.9	6.5	222	363	62.3	0.89	5.8	360	0	P
36	Congo	147.8	595.4	6.4	140	150	144.4	0.86	3.6	520	0	I
37	El Cobre	151.9	601.5	65.2	169	204	19.0	1.09	19.9	380	0	P
38	Los Guaos	152.3	602.3	34.5	117	207	31.9	2.02	12.2	390	0	P
39	San Juan	146.5	605.6	138	144	184	9.9	1.06	27.0	220	0	P
40	Sardinero	145.5	609.7	18.4	57	95	10.9	0.89	9.1	99	0	P
41	Justicí	144.8	613.2	2.8	60	58	13.3	0.85	6.0	80	0	I
42	Carpintero	145.5	618.3	16	319	302	72.7	1.21	8.8	640	0	I
43	Juraguá	143.4	621.4	22.3	251	274	76.5	1.12	12.3	940	0	P
44	Arenas	142.7	622.5	16.3	389	387	67.9	1.16	10.6	720	0	P
45	Magdalena	148.3	624.2	33.1	374	359	40.4	1.20	13.1	780	0	P
46	Duarte	144.0	625.2	2.6	120	140	80.0	0.90	5.0	240	0	I
47	Guinea	140.3	626	2.6	90	100	35.0	0.90	4.0	160	20	I
48	Cajobabo	139.2	627.8	3.6	160	200	45.3	0.95	7.5	340	0	I
49	Uvero 1	138.0	625.5	2.2	110	100	37.5	0.95	4.0	150	0	I
50	Sigua	137.9	637.8	46.9	255	311	37.4	1.25	19.3	720	0	I
51	Baconao	139.3	645.1	248	418	360	9.9	1.05	73.8	730	0	P
52	Cauto	203.8	575.0	2192	218	116	6.85	0.91	113	825	50	P
52.1	Cayaguasán	193.12	590.3	85.8	142	54	3.6	1.47	37.9	230	95	P
52.2	Jagua	191.0	593.7	158	254	133	10.7	1.23	44.7	560	80	P
52.3	Guaninicún	183.4	594.2	636	226	94	7.14	0.80	55	750	83	P
52.4	Yarayabo	172.4	587.1	141	245	157	7.1	1.24	35.1	360	111	P
52.5	Caney	170.8	583.5	87.3	261	189	15.8	0.94	30.4	600	120	P
52.6	Baraguá	197.5	586.9	36.2	215	163	19.1	1.29	25.1	550	70	P
52.7	Cañas	165.8	583.3	121	332	400	18.0	0.78	25.1	660	135	P
52.8	Grande Guanini	181.8	596.2	90.3	197	79	12.7	0.78	31.1	480	85	P
52.9	Bayate	191.7	593.4	29	218	176	20.4	1.25	16.3	555	80	P
52.10	Mefán	193.8	589.1	60.5	140	63	3.6	2.07	29.5	200	95	P
52.11	Bio Bio	203.8	575.0	263	113	34	15.1	0.61	29.8	500	50	P
52.12	Contramaestre	200.8	559.2	908	265	146	10.1	0.69	80	920	40	P
52.12.1	Mogote	174.5	558.7	145	511	349	25.9	0.79	37.3	1080	115	P
52.12.2	Rico	169.4	562.6	24.6	313	308	44.3	0.74	11.3	620	120	P
52.12.3	Guaninao	188.1	564.6	214	159	89	14.5	1.03	27.3	450	55	P
52.12.4	Alegría	194.5	563.1	48.2	107	32	9.0	0.61	14.4	180	50	I
53	Mayarí	198.4	623.6	770	313	300	4.7	1.2	50.5	600	80	P
54	Guantánamo	163.8	645.8	483	216	210	6.3	1.01	43.8	380	75	P

Leyenda:

A - Área de la cuenca en km²

Hm - Altura media de la cuenca en m

Lr - Longitud del río en km

H1 - Cota del nacimiento del río en msnm

H2- Cota de la desembocadura del río msnm

Yr- Pendiente del río en o/oo

Yc - Pendiente media de la cuenca en o/oo

Dd - Densidad de Drenaje km/km²

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

La altura media de las cuencas oscila entre 60 y 1000 metros con respecto al nivel medio del mar concentrándose entre los 100 y 600 metros (Durand.M.T., 2017).

< de 100	-----	3
101- 200	-----	11
201- 300	-----	8
301- 400	-----	12
401- 500	-----	4
501- 600	-----	6
601-700	-----	2
701-800	-----	4
801- 900	-----	3
901-1000	-----	1

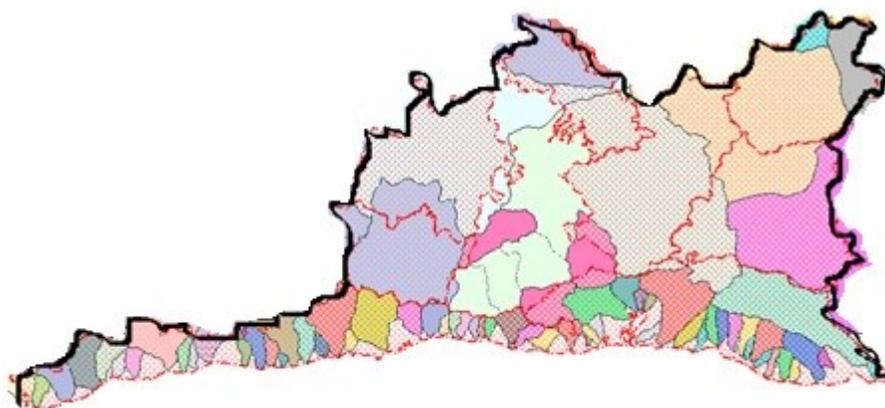


Figura 3. Mapa de las cuencas hidrográficas de la provincia de Santiago de Cuba. Fuente (Durand.M.T., 2017)

1.4 Variables hidrológicas

Al realizar el análisis del ciclo hidrológico de una región cualquiera es necesario plantear un balance hídrico, que permitirá conocer cualitativamente el potencial de una determinada región. Para ello es necesario conocer y medir cada uno de los procesos del ciclo hidrológico.

Cuba es un país en el que necesariamente hay que ir hacia una óptima utilización de los recursos hídricos, pues de acuerdo al desarrollo de los planes agrícolas e industriales provistos y el desarrollo poblacional, el consumo de agua se elevará

considerablemente, lo cual ha llevado al gobierno revolucionario a una política de construcción acelerada de embalses que asegure el abastecimiento de agua a la población en cualquier periodo del año y estaciones de captación, para lo cual se hace necesario la estimación de las principales variables (precipitación – escurrimiento).

La provincia de Santiago de Cuba no está ajena a esta política de almacenaje y regulación de este limitado recurso (el agua) y la relación entre las características geomorfológicas de las cuencas y climáticas permiten estimar de forma rápida el escurrimiento de una cuenca

1.4.1 Principales variables hidrológicas

Las variables hidrológicas en las que se enfoca este estudio son la precipitación y el escurrimiento.

Precipitación

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico, llevando agua dulce a la parte emergida de la corteza terrestre y, por ende, favoreciendo la vida en nuestro planeta, tanto de animales como de vegetales, que requieren agua para vivir. La precipitación se genera en las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua aumentan de tamaño hasta alcanzar una masa en que se precipitan por la fuerza de gravedad.

La precipitación es el agua líquida o sólida que cae al suelo terrestre a través de diversas formas. Si una nube es cálida por estar en altitudes bajas, caerá lluvia. Pero si la nube es más fría por estar en altitudes más altas, el agua se congelará parcial o totalmente y caerá en forma de aguanieve, nieve, cristales de hielo o granizo. Es decir, que el estado del agua al caer dependerá, en parte, de la altura de la nube. Sobre un área grande la precipitación suele ser menos intensa que sobre un área pequeña.

De acuerdo con la causa que origina el ascenso de la masa de aire húmedo, pueden distinguirse tres tipos de precipitaciones:

Las **convectivas**: este tipo de precipitación tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que el circundante. Este aire más caliente, asciende y se enfría adiabáticamente y alcanza su punto de condensación debido a la velocidad vertical adquirida, formándose nubosidad de tipo cumuliforme, la cual genera precipitaciones en forma de aguaceros (Meteorología y Climatología, 1968). Las

precipitaciones convectivas, se originan en tiempo cálido y pueden estar acompañadas de vientos, relámpagos, truenos y vientos locales, pero principalmente consisten en lluvia y ocasionalmente de granizo (Remenieras, 1974).

Precipitaciones orográficas: Cuando los vientos cargados de humedad, moviéndose ordinariamente del océano a la Tierra, encuentran una barrera montañosa, la masa de aire es forzada a ascender, enfriándose y originándose las precipitaciones que se presentan en forma de lluvia o nieve, siendo muy irregulares en importancia y localización. Comúnmente, las precipitaciones mayores a barlovento, disminuyendo rápidamente a sotavento y el máximo se presenta antes de la divisoria. Resulta oportuno aclarar que algunas veces el efecto orográfico es únicamente el mecanismo de inicio de la actividad convectiva, lo anterior principalmente en masas de aire inestables (Meteorología y climatología, 1972).

Precipitaciones ciclónicas o de frentes: Estas precipitaciones están asociadas al paso de un ciclón y pueden corresponder a dos casos: no frontal y frontal. La precipitación no frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión (Meteorología y climatología, 1972). La precipitación frontal puede estar asociada a un frente frío o a un frente cálido.

Las precipitaciones constituyen la única fuente de agua en el archipiélago cubano, como recurso natural renovable anual. Es un recurso estratégico limitado, finito e imprescindible para el desarrollo sostenible del país.

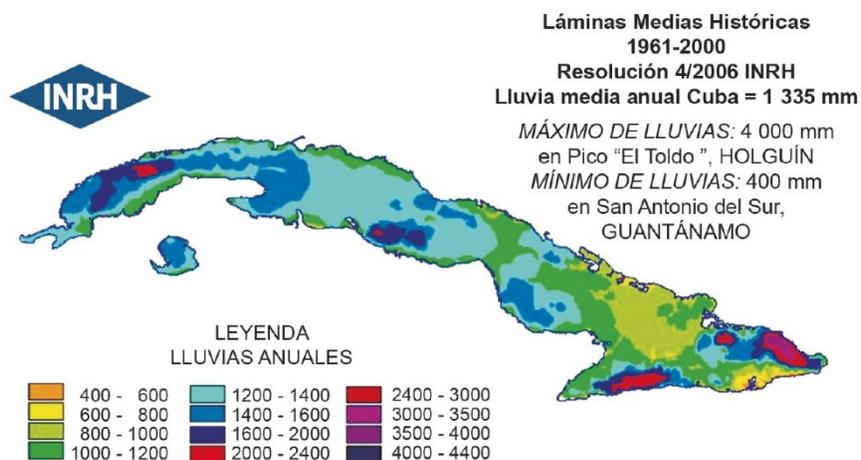


Figura 4. Láminas de precipitación medias históricas.

Los Recursos Hídricos Potenciales (RHP) provenientes de las precipitaciones han sido evaluados en 38100 millones de m³, de ellos, 6400 millones de m³ subterráneos en 165 unidades hidrogeológicas y los restantes 31100 millones de m³ de aguas superficiales, localizados en 642 cuencas hidrográficas. La lámina media anual considerada fue de 1375 mm. En la provincia Santiago de Cuba la lámina de precipitación media es de 1353 mm.

Escurrimiento

El escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye por gravedad por la superficie del terreno, o en el interior del mismo (MUNDIAL, 1974). Otra definición más completa, indica que el escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes superficiales, sean estas, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores (Maderey Rascon, 1977) .

El escurrimiento es el agua que fluye sobre la superficie del terreno hasta el cauce más cercano y solo se produce en los eventos de lluvia. Es un componente de la esorrentía. El escurrimiento es función de la intensidad de la precipitación y de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, de la extensión de la cuenca hidrográfica considerada, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo. El escurrimiento en el terreno sigue caminos variables e interconectados debido principalmente a depresiones y a la vegetación existente.

Específicamente, se define como flujo o escurrimiento virgen, el de una corriente no afectada por derivaciones artificiales, almacenamientos u otras obras construidas por el hombre, en los cauces o en la cuenca de drenaje (Chow, 1964).

El escurrimiento, el cual también se conoce como gasto de un cauce, descarga de una corriente, rendimiento de la cuenca o aportación líquida, normalmente se expresa en las tres formas siguientes (Ward, 1975):

1. En unidades de gasto, es decir, como un volumen en la unidad de tiempo. Usualmente se expresa en m³/s o en Hm³/año.
2. En unidades de gasto unitario, o sea en m³/s/km² o Hm³/km²/año.

3. En lámina o tirante equivalente sobre la cuenca, en milímetros por día, por mes o por año. Estas unidades son particularmente útiles al comparar la precipitación y el escurrimiento.

Existen diferentes métodos para determinar el escurrimiento medio (W_0) hiperanual en los ríos sin registros de observaciones, entre ellos se pueden mencionar algunos de mayor uso tradicionalmente en Cuba: “Mapas de Isolíneas del Escurrimiento”, I Variante Ing. José Luis Batista, II Variante Ing. José Luis Batista, III Variante José Luis Batista, Abel Alfonso, Nadir Fernández, Métodos Genéticos, Balance Hídrico, Analogía, Fórmula Clásica y Modelos Matemáticos e Hidrológicos, para la obtención de los datos que utilizaremos en nuestro estudio se determinó obtener el escurrimiento medio por la II Variante del Ing. José Luis Batista para todas las cuencas a partir de la lluvia obtenida por la última versión del isométrico (1961-2000) y el C_v se obtuvo por la expresión de Riazanov.

$$C_v = 0.95 - 0.36 * \log M_0$$

Donde: M_0 es el módulo del escurrimiento expresado en l/s/km², de ahí el Volumen de escurrimiento en 10⁶ m³ y el gasto en m³/s.

$$W_0 = \frac{Y_0 * A_c}{1000} \qquad Q_0 = \frac{W_0}{31.54}$$

Y_0 → lámina media de escurrimiento (mm)

A_c → área de la cuenca (km²)

El módulo del escurrimiento es expresado por:

$$M_0 = \frac{Q_0 * 1000}{A_c}$$

Del Archivo de la Delegación Provincial de los Recursos Hidráulicos (DPRH) donde se cuenta con la base de datos de hidrología y artículos publicados por varios especialistas se relacionan en la tabla 2 los valores de las principales variables hidrológicas de las cuencas hidrográficas de la provincia Santiago de Cuba. Estos

valores han sido determinados empleando los parámetros morfométricos contenidos en la tabla 1 (Durand.M.T., 2017).

Tabla 2. Principales parámetros hidrológicos por cuencas hidrográficas (Durand.M.T., 2017).

No.	Cuencas	Lluvia media	Yo (mm)	Wo (10 ⁶ m ³)	Qo (m ³ /s)	Mo l/s/km ²	Cv
1	El Macho	1740	700	9.8	0.311	22.2	0.46
2	La Magdalena	1820	778	43.8	1.38	24.7	0.45
3	La Plata	1900	862	49.9	1.58	27.3	0.43
4	Palma Mocha	1650	571	19.7	0.62	18.1	0.5
5	Las Cuevas	1850	577	4.54	0.14	18.23	0.5
6	Potrerrillo	1500	406	5.90	0.19	12.9	0.55
7	Ocujal	1600	406	1.55	0.049	12.8	0.55
8	Turquino	1970	1045	118.1	3.74	3.3	0.7
9	La Bruja	1930	650	8.51	0.27	20.6	0.49
10	Peladero	1600	490	41.7	1.32	15.5	0.52
11	Las Agujas	1900	610	0.5	0.016	19.8	0.48
12	Avispero	2100	912	8.65	0.274	28.9	0.42
13	Uvero	1600	490	11.76	0.37	15.5	0.52
14	Las Bijas	1780	740	8.95	0.28	23.5	0.46
15	Bayamita	1700	652	40	1.2	20	0.48
16	Río Grande	1875	830	20.75	0.65	26.3	0.44
17	Papayo	1645	559	6.15	0.19	17.7	0.5
18	Guamá	1900	862	71.55	2.27	27.3	0.43
19	Las Calabazas	1470	281	2.36	0.07	8.9	0.61
20	El Tabacal	1400	257	0.36	0.011	8.15	0.62
21	Sevilla	1480	354	32.82	1.04	12.5	0.56
22	Quiebra Seca	1600	348	4.21	0.13	10.99	0.58
23	El Macío	1450	378	9.22	0.29	11.6	0.57
24	Seco	1470	385	9.66	0.31	12.2	0.56
25	Tengua	1400	257	0.21	0.01	8.37	0.62

No.	Cuencas	Lluvia media	Yo (mm)	Wo (10 ⁶ m ³)	Qo (m ³ /s)	Mo l/s/km ²	Cv
26	La Trampa	1550	438	3.9	0.12	13.9	0.54
27	Quiviján	1530	425	3.91	0.124	13.5	0.54
28	Masandi	1400	257	1.72	0.054	8.1	0.62
29	Aserradero	1940	290	2.17	0.069	9.2	0.6
30	Cojimar	1400	257	7.45	0.236	8.1	0.62
31	Boca Dos Ríos	1480	394	6.11	0.194	12.5	0.55
32	Cañizo	1550	442	4.07	0.13	14	0.54
33	Nima Nima	1600	490	10.1	0.32	15.5	0.52
34	Rancho Cruz	1300	182	0.15	0.005	6.25	0.66
35	Río Seco	1300	267	1.74	0.055	8.5	0.61
36	Congo	1080	106	0.34	0.01	3.36	0.76
37	El Cobre	1130	179	11.67	0.37	5.7	0.68
38	Los Guaos	1000	61.1	2.11	0.067	11	0.57
39	San Juan	1190	220	30.36	0.96	7	0.65
40	Sardinero	1060	112	2.06	0.0165	3.5	0.75
41	Justicí	1100	116	0.16	0.005	3.57	0.75
42	Carpintero	1220	169	2.7	0.086	5.4	0.69
43	Juraguá	950	378	8.45	0.268	12	0.56
44	Arenas	1300	267	4.35	0.138	8.5	0.61
45	Magdalena	1320	279	9.23	0.29	8.9	0.61
46	Duarte	960	450	1.17	0.037	12	0.56
47	Guinea	900	434	1.13	0.036	13	0.55
48	Cajobabo	1000	613	2.21	0.007	14	0.54
49	Uvero 1	940	1277	2.81	0.089	11	0.57
50	Sigua	940	404	18.95	0.601	13	0.55
51	Baconao	1330	284	70.43	2.23	9	0.61
52	Cauto	1140	190	416.48	13.2	6	0.67
52.1	Contramaestre	1200	226	205.21	6.5	7.2	0.64

No.	Cuencas	Lluvia media	Yo (mm)	Wo (10 ⁶ m ³)	Qo (m ³ /s)	Mo l/s/km ²	Cv
53	Mayarí	1420	356	274.12	8.69	11.28	0.57
54	Guantánamo	1080	126	60.86	1.93	4.0	0.73

2. Métodos estadísticos de correlación y regresión

Frecuentemente es necesario investigar posibles relaciones (de casualidad o de interdependencia) entre dos o más variables (M.F.J., 1976), tal relación, en caso de existir deberá ser estudiada a través de los análisis estadísticos de regresión y correlación; estos análisis constituyen unas de las herramientas estadísticas más antiguas usadas en la hidrología. Primeramente, fueron utilizadas para estimar datos faltantes y ampliar el registro de corta extensión, de una cierta estación climatológica o hidrométrica, en base a la información disponible en las estaciones cercanas. Hoy en día, sus aplicaciones incluyen además el estudio entre dos o más variable hidrológicas y la investigación de la dependencia entre los eventos sucesivos de una serie cronológica de datos hidrológicos (Yevjevich, 1964).

La diferencia entre regresión y correlación es bastante clara. La regresión permite obtener la ecuación matemática que expresa la variable dependiente (y), cuando otra u otras variables llamadas independientes (x) se suponen conocidas y por lo tanto permite calcular valores de (y) a partir de los de (x) (Martin A., 1976).

En cambio, por medio de la correlación se calcula el grado de dependencia o asociación entre dos o más variables, representado numéricamente por el llamado coeficiente de correlación (Martin A., 1976).

Cuanto más amplio sea el registro o serie de valores observados en una cierta estación climatológica o hidrológica, tanto mayor serán las estimaciones e inferencias estadísticas basadas en tales datos. Por lo anterior casi siempre se tiende a tratar de incrementar la información de una cierta estación, en base a la de otra cercana, con la ayuda de la regresión lineal entre sus datos comunes. En general, casi siempre se utiliza la regresión para incrementar los registros anuales, ya sean de precipitaciones o escurrimientos (Campos Aranda, 1992).

2.1 Software STATGRAPHICS Centurion

STATGRAPHICS Centurion es una potente herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con extraordinarios gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto, desde los protocolos de gestión Six Sigma hasta los procesos de control de calidad.

Incluye funciones estadísticas avanzadas, capaces de proporcionar rigurosos análisis propios de los profesionales estadísticos más exigentes y experimentados, y al mismo tiempo ofrece una interface muy intuitiva, con funciones de asistencia exclusivas, de tal forma que proporciona la simplicidad suficiente para permitir a un analista inexperto realizar procedimientos complejos (<https://statgraphics.net/>, n.d.).

Statgraphics Centurion está diseñado para todos aquellos que deseen hacer análisis profundos de datos sin invertir semanas enteras aprendiendo a usar un paquete estadístico. Los procedimientos estadísticos que contiene Statgraphics Centurion van desde resúmenes de estadísticos hasta diseño de experimentos. Sin embargo, usted no necesita ser un estadístico para usar el programa. El software está diseñado para ser utilizado a través de menús, y existen herramientas como StatWizard y StatAdvisor para ayudarlo a usar el programa de la forma más eficiente (<https://www.software-shop.com/producto/statgraphics>, n.d.).

2.2 Procedimiento estadístico

El análisis de correlación multivariado se lleva a cabo evaluando el nivel de relación lineal entre cada una de las variables hidrológicas y todas las variables morfométricas. Las seleccionadas para este estudio son:

Variables hidrológicas

1. Precipitación media anual de la cuenca, P_o , en mm.
2. Lámina de evaporación media anual de la cuenca, Y_o , en mm.
3. Volumen de escurrimiento medio anual, W_o , en Hm^3 .
4. Caudal medio anual del río principal de la cuenca, Q_o , en m^3/s .
5. Módulo de escurrimiento medio anual de la cuenca, M_o , en $m^3/s/ha$.

Variables morfométricas: Se corresponden con los parámetros morfológicos en estudio de la cuenca.

1. Área de la cuenca, A_c , en km^2 .
2. Altura media de la cuenca, H_m , en m.
3. Pendiente media de la cuenca, Y_c , en ‰.
4. Pendiente media del río principal de la cuenca, Y_r , en ‰.
5. Densidad de drenaje de la cuenca, D_d , en km/km^2 .
6. Longitud del río principal de la cuenca, L_r , en km.

Una vez determinado que variables morfométricas están fuertemente correlacionadas con cada variable hidrológica se procede a desarrollar un análisis de regresión, de manera que pueda obtenerse el modelo que mejor explica la variabilidad de cada variable hidrológica a partir de las variables morfométricas.

Con el uso del software STATGRAPHICS Centurión XV, el proceso general realizado es el siguiente:

1. Se realiza un análisis estadístico descriptivo de las variables que intervienen en el estudio de correlación multivariado.
2. Se determinan las variables fuertemente correlacionadas a partir de la determinación de la matriz de correlación utilizando los métodos momento producto de Pearson y el de correlación ordinal de Spearman.
3. Se efectúa un estudio de regresión considerando las variables fuertemente correlacionadas. En esta etapa se realiza una regresión simple en los casos en que es posible identificar una variable morfométrica significativamente relacionada con la variable hidrológica o una regresión multivariada cuando es necesario incluir varias variables morfométricas para explicar la variabilidad de la variable hidrológica. En este último supuesto, se lleva a cabo también una regresión múltiple paso a paso, primero adicionando variables al modelo y luego eliminando variables del mismo, lo cual permite evaluar cuáles son las variables más importantes que deben incluirse y de esta forma simplificar el modelo.
4. Análisis de los resultados y selección de los modelos satisfactorios teniendo en cuenta principalmente el estadístico R^2 , el cual indica el grado de variabilidad de la variable hidrológica que es explicado por el modelo. Para este estudio se

considera que valores de R^2 mayores que el 60% son aceptables, aunque son deseados valores por encima del 75%.

3. Análisis y discusión de los resultados

Siguiendo el procedimiento explicado anteriormente, se realizó el análisis de correlación multivariado y el estudio de regresión, cuyos resultados son presentados y analizados a continuación.

Estadística descriptiva de las variables

La tabla 3 muestra el resumen estadístico de todas las variables que intervienen en los análisis.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos más importantes de las variables hidrológicas y morfométricas del estudio.

Variables	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Po	54	1454.81	317.573	21.83%	900	2100	1200	0.0184888	-1.31071
Yo	54	443.761	254.702	57.40%	61.1	1277	1215.9	3.19373	1.76191
Wo	54	30.2872	72.3437	238.86%	0.15	416.4	416.25	12.0373	26.2218
Qo	54	0.955074	2.29417	240.21%	0.005	13.2	13.195	12.0404	26.231
Mo	54	13.0037	6.55866	50.44%	3.3	28.9	25.6	2.27916	-0.0160114
Ac	54	92.8113	316.454	340.97%	1.8	2192	2190.2	17.8116	57.3495
Hm	54	384.944	234.69	60.97%	57	985	928	2.14735	-0.479906
Yc	54	341.074	147.87	43.35%	58	615	557	-0.246429	-1.26721
Yr	54	85.8593	59.9843	69.86%	4.7	234	229.3	2.10629	-0.35239
Dd	54	1.10444	0.412204	37.32%	0.54	2.7	2.16	5.63257	6.48085
Lr	54	15	18.497	123.31%	3	113	110	11.0991	24.1335

Los estadísticos descriptivos muestran que en general existe una gran variabilidad de los datos de algunas de las variables, así como, desviaciones de la normalidad que pueden ser importantes (Wo, Qo, Ac, Dd y Lr). Estos elementos no invalidan los procedimientos que se utilizan en el presente estudio, pero deben ser considerados con mayor profundidad en análisis posteriores.

Correlación entre las variables

A partir de los resultados obtenidos con el STATGRAPHICS, en la siguiente tabla se consolidan los resultados del análisis de correlación multivariada por el método de

momento producto de Pearson para cada conjunto de variable hidrológica-variables morfométricas.

Tabla 4. Parámetros de la correlación entre las variables hidrológicas y morfométricas (método momento producto de Pearson).

Variablen	Parámetros	Ac	Hm	Yc	Yr	Dd	Lr
Po	CC	-0.1582	0.7316	0.8024	0.5705	0.1511	-0.0978
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.2532	0.0000	0.0000	0.0000	0.2755	0.4815
Yo	CC	-0.1688	0.512	0.4869	0.272	-0.0393	-0.1378
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.2224	0.0001	0.0002	0.0466	0.7776	0.3203
Wo	CC	0.9165	0.0009	-0.1177	-0.3748	-0.0697	0.875
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.0000	0.9946	0.3968	0.0052	0.6165	0.0000
Qo	CC	0.9166	0.0007	-0.1174	-0.3744	-0.0696	0.875
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.0000	0.9958	0.3977	0.0053	0.617	0.0000
Mo	CC	-0.1875	0.5724	0.6032	0.4251	0.0233	-0.1458
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.1746	0.0000	0.0000	0.0014	0.867	0.2927

Los parámetros de la correlación recogidos en la tabla anterior son el coeficiente de correlación lineal (CC), el número de pares de datos de cada variable utilizados para el cálculo de CC y el valor de probabilidad que prueba la significancia estadística de las correlaciones (P-valor).

El CC se mueve en el rango de valores de -1 a +1 y toma el valor de 0 cuando no existe ninguna correlación entre un par de variables. Los signos positivos o negativos indican como es el tipo de correlación lineal; positivo cuando al incrementar una variable también se incrementa la otra y negativo el caso opuesto. El P-valor revela estadísticamente el grado de correlación, por ejemplo, valores del P-valor menores de 0.05 indican que existen correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%.

Para ayudar a comprender la interpretación de la información de la tabla anterior, se toma como ejemplo la variable Po. Observando el valor del coeficiente de correlación

lineal en la fila correspondiente a Po debajo de cada variable morfométrica (columnas), se comprueba que existe una alta correlación positiva entre Po y Yc (CC = 0.8024), Po y Hm (CC = 0.7316) y en menor medida entre Po y Yr (CC = 0.5705). Lo anterior es también confirmado con los valores del P-valor que en todos los casos es de 0.0000. Siguiendo el razonamiento anterior se puede concluir que existe una alta correlación entre los siguientes conjuntos variable hidrológica-variable morfométrica:

- Po con Hm, Yc y Yr.
- Yo con Hm, Yc y Yr.
- Wo con Ac y Lr.
- Qo con Ac y Lr.
- Mo con Hm, Yc y Yr.

Puede notarse al analizar las relaciones anteriores como la densidad de drenaje no presenta correlación significativa con ninguna de las variables hidrológicas, lo cual sugiere que no sea incluida en los modelos de regresión.

Las relaciones anteriores también sugieren preliminarmente cuáles variables morfométricas pudiesen incluirse en el modelo de regresión para cada variable hidrológica. No obstante, estos resultados no son concluyentes pues puede existir colinealidad o alta correlación entre las variables morfométricas dando lugar a su exclusión del modelo por su pobre contribución a la explicación de la variabilidad de la variable hidrológica.

Los resultados del análisis de correlación de las variables empleando ahora el método de correlación ordinal de Spearman, se relacionan en la tabla 5. El método de Spearman analiza la asociación entre las variables a partir del orden de los datos en lugar de sus valores en sí y es menos susceptible a valores atípicos que el método de Pearson.

Tabla 5. Parámetros de la correlación entre las variables hidrológicas y morfométricas (método de correlación ordinal de Spearman).

Variables	Parámetros	Ac	Hm	Yc	Yr	Dd	Lr
Po	CC	0.1047	0.8011	0.8193	0.5907	0.1544	0.1139
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.446	0.0000	0.0000	0.0000	0.2611	0.407

Variables	Parámetros	Ac	Hm	Yc	Yr	Dd	Lr
Yo	CC	-0.0113	0.6138	0.6153	0.4004	0.0783	-0.0035
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.9342	0.0000	0.0000	0.0036	0.5687	0.9796
Wo	CC	0.8983	0.4775	0.4211	-0.3032	0.0905	0.8403
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.0000	0.0005	0.0022	0.0273	0.51	0.0000
Qo	CC	0.8984	0.4834	0.43	-0.2865	0.0982	0.8294
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.0000	0.0004	0.0017	0.037	0.4746	0.0000
Mo	CC	0.0141	0.6153	0.6255	0.4594	0.0611	0.0058
	Número de pares	54	54	54	54	54	54
	P-valor	0.918	0.0000	0.0000	0.0008	0.6564	0.9661

Los parámetros de correlación en este caso tienen igual significado y la interpretación de la información es análoga a la explicada para el método de Pearson. Como resultado se puede concluir que existe una correlación significativa entre los siguientes conjuntos de variables:

- Po con Hm, Yc y Yr.
- Yo con Hm, Yc y Yr.
- Wo con Ac, Hm, Yc, Yr y Lr.
- Qo con Ac, Hm, Yc, Yr y Lr.
- Mo con Hm, Yc y Yr.

Las correlaciones son similares a las obtenidas por el método de Pearson excepto para las variables hidrológicas Wo y Qo a las que se incorpora en ambos casos las variables morfométricas Yc y Yr.

Estudio de regresión

En la tabla que sigue se recogen los resultados más importantes del estudio de regresión.

Las variables Po, Yo y Mo pueden ser descritas a partir de un modelo de regresión lineal simple, es decir, que contiene una sola variable, mientras que Wo y Qo requieren de una regresión multivariada o un modelo con dos o más variables independientes. Es necesario aclarar que, aunque se presenta como resultado un modelo de regresión

simple para tres de las variables en estudio, se efectuó un análisis multivariado para todas las variables.

Tabla 6. Resultados del estudio de regresión.

Variable hidrológica	Tipo de regresión	Variabes con alta correlación	Variabes incluidas en el modelo	Modelo	R ²
Po	Simple	Hm, Yc, Yr	Yc	$Po = 867.026 + 1.72335*Yc$	64.39%
Yo	Simple	Hm, Yc, Yr	Hm	$Yo = 229.852 + 0.555688*Hm$	26.22%
Wo	Multivariada	Ac, Hm, Yc, Yr, Lr	Ac, Hm, Yr	$Wo = 9.85281 + 0.199618*Ac + 0.0564227*Hm - 0.230749*Yr$	87.22%
			Ac, Lr	$Wo = -1.20114 + 0.148824*Ac + 1.17839*Lr$	86.03%
Qo	Multivariada	Ac, Hm, Yc, Yr, Lr	Ac, Hm, Yr	$Qo = 0.306403 + 0.00633206*Ac + 0.00178289*Hm - 0.0072832*Yr$	87.20%
			Ac, Lr	$Qo = -0.0431059 + 0.00472167*Ac + 0.0373304*Lr$	86.03%
Mo	Simple	Hm, Yc, Yr	Yc	$Mo = 3.87832 + 0.0267548*Yc$	36.39%

Tomando la variable Po como caso de estudio, el procedimiento seguido se explica a seguir. Primeramente, se realizó una regresión multivariada considerando todas las variables morfométricas; el modelo obtenido, con un R² de 66.56% fue:

$$Po = 851.542 + 0.0104994*Ac + 0.0379429*Hm + 1.44205*Yc + 1.05085*Yr - 5.08951*Dd + 0.749476*Lr$$

Seguidamente, se realizó una regresión multivariada incluyendo sólo las variables morfométricas con alta correlación con la variable hidrológica evaluada. Para el caso de Po son, de acuerdo al resultado del análisis de correlación (Tablas 4 y 5), Hm, Yc y Yr. El modelo resultante con un R² de 66.35% fue:

$$Po = 868.171 + 0.0734*Hm + 1.41364*Yc + 0.887882*Yr$$

A continuación, se llevó a cabo una regresión multivariada paso a paso en dos sentidos, adicionando y quitando variables del modelo que incluía todas las variables. En ambos casos, el resultado obtenido fue que era suficiente el uso de un modelo de regresión lineal simple con la variable independiente Yc. Luego, se procedió a efectuar la regresión simple con esta variable independiente que es la presentada en la tabla 6.

Puede constatarse en las tablas 4 y 5, que la variable Yc es la de mayor coeficiente de correlación con respecto a Po, con un valor que puede considerarse alto (muy buena

correlación se acepta para $CC > 0.85$), por lo que el resultado de un modelo simple es lógico. Además, puede corroborarse que el coeficiente de ajuste R^2 es, en términos prácticos, el mismo para los tres modelos: con la variable Y_c , con las tres variables significativas de alta correlación y con todas las variables. Al incluir las restantes variables morfométricas al modelo de regresión simple sólo logra incrementare R^2 de 64.39% a 66.56%, complejizando innecesariamente el modelo.

De forma similar se realizó el análisis para cada una de las variables hidrológicas. Se puede observar en la tabla 3 que sólo las variables W_o y Q_o pueden ser explicadas satisfactoriamente con los modelos propuestos de 2 y 3 variables morfométricas, respectivamente, al presentar un coeficiente R^2 mayor del 85%; téngase en cuenta que es considerado adecuado un valor mayor de 75% para estos estudios. La otra variable hidrológica que tiene un ajuste aceptable con las variables morfométricas analizadas es P_o . Sin embargo, los modelos obtenidos para las variables Y_o y M_o son insuficientes dados los bajos valores de R^2 .

Conclusiones

Se proponen tres modelos estadísticos con adecuado nivel de confiabilidad que pueden ser empleados para la estimación de las variables hidrológicas lluvia media anual, volumen del escurrimiento medio anual y caudal de escurrimiento medio anual, de las cuencas de la provincia Santiago de Cuba.

El volumen del escurrimiento medio anual y el caudal de escurrimiento medio anual, son las variables hidrológicas que muestran la mejor correlación con las variables morfométricas. También puede considerarse que la lluvia media anual presenta un aceptable nivel de correlación.

Las variables hidrológicas lámina de evaporación media anual y módulo del escurrimiento medio anual no mostraron buena correlación con las variables morfométricas de las cuencas.

Recomendaciones

Continuar el estudio presentado valorando la inclusión de otros parámetros morfométricos de las cuencas, así como, la evaluación de regionalización y/o subdivisión de los datos de las cuencas por características de semejanza.

Referencias Bibliográficas

1. Campos Aranda, A. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Mexico D.F.
2. Chow, V. (1964). Section 14 in the Handbook of Applied Hydrology. Em V. Chow, "Runoff". New York, USA: Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company.
3. Durand.M.T. (2017). Actualización del potencial hídrico de la Provincia Santiago de Cuba. *Voluntad Hidráulica*.
4. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico. (2020). *Redes Hidrológicas Estadísticas 2020*. Santiago de Cuba.
5. García Fernández, J. M., & Gutiérrez Díaz, J. B. (2015). *LA GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN CUBA*. La Habana, Cuba .
6. <https://statgraphics.net/>. (s.d.).
7. <https://www.software-shop.com/producto/statgraphics>. (s.d.). Obtido de <https://www.software-shop.com/producto/statgraphics>.
8. M.F.J., M. B. (1976). *Elementos de probabilidad y Estadística*. México D.F.: Representaciones y servicios de Ingeniería.
9. Maderey Rascon, L. (1977). "El Agua de Escurrimiento en la República Mexicana". México, DF.
10. Martin A., M. . (1976). *Nociones de Estadística Aplicada a la Hidrología*. Barcelona, España: Ediciones Omega.
11. Meteorología y Climatología. (1968). *Manual de Hidrología*.
12. Meteorología y climatología. (1972). *Manual de meteorología*, 42 ,41.
13. MUNDIAL, O. M. (1974). "Glosario Hidrológico Internacional". Ginebra, Suiza.
14. Remenieras, G. (1974). La Atmósfera y. Em G. Remenieras, *Tratado de Hidrología* (p. 79). Barcelona España: Técnicos Asociados S.A.
15. Ward, R. (1975). *Principles of Hydrology*. London England: McGraw Hill Publishing Company Limited.
16. Yevjevich, V. (1964). *Statistical and Probability Analysis of Hydrologic data*. New York U.S.A.: McGraw Hill Book Company.