

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-06-06

Artículos

Evaluación del potencial hídrico superficial de la cuenca Guantánamo-Guaso, Cuba

Evaluation of the superficial hydric potential of the Guantanamo-Guaso basin, Cuba

Yinet Marzo-Manuel¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6605-5838>

Liliana María Gomez-Luna², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1282-3392>

¹Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, Guantánamo, Cuba,
yinet.marzo@gmail.com

²Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado de la Universidad de
Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, lilimagl@gmail.com

Autora para correspondencia: Yinet Marzo-Manuel,
yinet.marzo@gmail.com

Resumen

En la cuenca Guantánamo-Guaso, ubicada en la región oriental de Cuba, los recursos hídricos están sometidos a fuertes presiones debido al desarrollo poblacional, agropecuario e industrial, constatándose el

deterioro del ecosistema con la consiguiente afectación de sus bienes y servicios, e implicaciones en el abasto de agua. El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial hídrico superficial de la cuenca Guantánamo-Guaso a partir de la evaluación de la cantidad y calidad de sus recursos hídricos superficiales. Se utilizaron los datos de precipitaciones de 60 equipos pluviométricos localizados en el área, obteniéndose el mapa isoyético para determinar el escurrimiento medio hiperanual, considerando que la cuenca no posee estaciones hidrométricas. El potencial hídrico superficial total (232.521 hm^3) resultó ser reducido en un 28 % por requerimientos ambientales y en un 19 % por la calidad del agua. Los problemas asociados con la calidad de agua se relacionan con la existencia de fuentes contaminantes; mientras que la disponibilidad está influenciada, en el último decenio, por intensas sequías, cuyos efectos se han agravado en la última década como consecuencia de los efectos del cambio climático. Esta investigación constituye un punto de partida para la toma de decisiones en la gestión hídrica de la cuenca Guantánamo-Guaso, a fin de garantizar el abasto de agua para diferentes propósitos.

Palabras clave: cuenca Guantánamo-Guaso, gestión hídrica, potencial hídrico, sequía.

Abstract

In the Guantnamo-Guaso basin, located in the eastern region of Cuba, the water resources are subjected to strong pressures due to population, agricultural and industrial development, confirming the deterioration of the ecosystem with the consequent effect on goods and services, and

implications in the water supply. The objective of this research was to determine the surface water potential of the Guantánamo-Guaso basin from the evaluation of its surface water resources in quantity and quality. Rainfall data from 60 pluviometric equipment located in the area were used, obtaining the isoyetic map to determine the mean hyperannual runoff, considering that the basin does not have hydrometric stations. The total surface water potential (232.521 hm^3), which turned out to be reduced by 28 % due to environmental requirements and 19 % due to water quality. The problems associated with water quality are related to the existence of polluting sources and eutrophication; while the availability is influenced by intense droughts, intensified in the last decade by climate change effect. This research constitutes a starting point for decision-making in the water management of the Guantánamo-Guaso basin in order to guarantee the water supply for different purposes.

Keywords: Guantánamo-Guaso basin, water management, water potential, drought.

Recibido: 02/03/2023

Recibido: 04/08/2023

Publicado Online: 21/08/2023

Introducción

En el último decenio se ha producido un incremento en la demanda de los recursos hídricos debido a diferentes causas, entre las que se puede mencionar el estilo de vida moderna, que implica un alto consumo del recurso y la producción excesiva de residuos, lo que ha acentuado los problemas asociados con el deterioro de la calidad del agua, a lo que se unen los impactos del calentamiento global (Flores, 2014; Rojas *et al.*, 2013). Ante la degradación de ecosistemas acuáticos, las fuertes presiones antrópicas, y el crecimiento de núcleos poblacionales, ciudades y megaciudades, la escasez de agua ha devenido en uno de los principales problemas del siglo XXI.

En este contexto, proteger, conservar y distribuir equitativamente los recursos hídricos, en función de una cobertura responsable, constituye un gran desafío para los prestadores del servicio de aprovisionamiento de agua y saneamiento, siendo un asunto clave para el manejo evaluar la cantidad, calidad y disponibilidad de agua, considerando las necesidades humanas, a fin de lograr la gestión sostenible del recurso, en consonancia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, cuya finalidad es asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua, y el saneamiento para todos (ONU, 2018).

Respecto a la solución de conflictos derivados del agua, en el Programa de Acción de la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA), celebrada en Dublín, Irlanda (1992), se señala que “la entidad geográfica más apropiada para la planificación y gestión de los recursos hídricos es la cuenca fluvial” (Aguirre, 2011; OMM, 1992).

Por lo tanto, el concepto de cuenca surge como estrategia teórica orientada a resolver la crisis del agua, relativa a problemas y conflictos asociados con su uso y disponibilidad (González, Arzate, & Guerrero, 2016).

En el contexto cubano, la cuenca, según la Ley N° 124 de las aguas terrestres de Cuba, en su artículo 8.1, se define como: “el área delimitada por la divisoria de las aguas superficiales y subterráneas que conforman un sistema hídrico, que las conduce a un río principal, lago, zona de infiltración o costa. Los límites de la división de las aguas superficiales y subterráneas no siempre coinciden, por lo que se extienden hasta incluir los acuíferos o tramos subterráneos, cuyas aguas confluyen hacia la cuenca en cuestión, a los efectos de la gestión integrada de las aguas terrestres” (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2017).

El enfoque de gestión por cuencas se inició con la necesidad de administrar el agua, en particular por el uso múltiple de este recurso, y la necesidad de controlar, o al menos tener respuestas ante el efecto de los fenómenos hidrológicos extremos. Las cuencas inicialmente se tomaron como áreas de grandes inversiones hidráulicas dirigidas a aumentar la oferta de agua, energía y navegabilidad, entre otros (Flores, 2014). Su importancia y pertinencia como unidad territorial para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) ha sido enfatizada por varios autores (Forero & Mosquera, 2014; González *et al.*, 2016; Jouravlev, 2009; Martínez & Villalejo, 2018; Terán, 2018).

La cuenca es un marco apropiado para la gestión ambiental y la planificación de medidas destinadas a corregir impactos ambientales como consecuencia del uso y manejo inadecuado de los recursos naturales. Este

tema ha sido debatido en las más importantes conferencias internacionales sobre el agua, como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua, Mar del Plata, Argentina (marzo de 1977); la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente, CIAMA, Dublín, Irlanda (enero de 1992); Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, CNUMAD, Río de Janeiro, Brasil (junio de 1992), y en el Plan de Aplicación de la Decisiones de la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, Sudáfrica (septiembre de 2002) (Jouravlev, 2009).

Particularmente, en Cuba, a partir de la década de 1980, se comienza a aplicar en las investigaciones un enfoque integrado que considera la cuenca hidrográfica como unidad básica de estudio, utilizándose, a partir de entonces, como ámbito de aplicación de los programas y planes de manejo integral de los recursos naturales, en su vínculo con el desarrollo económico y social (González, 2017). En el país existen 632 cuencas hidrográficas (Batista, 2016), identificándose como la principal fuente de formación de los recursos hídricos las precipitaciones, por lo que la intensificación y recurrencia de los periodos de sequía coloca a algunas regiones del país en una situación crítica (CITMA, 2016), lo que se ha acentuado por la distribución irregular del recurso, su uso ineficiente y el grado de deterioro relacionado con las presiones antrópicas, y los problemas de contaminación.

Entre las cuencas priorizadas a nivel nacional se encuentra la cuenca Guantánamo-Guaso, en la provincia Guantánamo (Gutiérrez & García, 2015). Esta provincia, ubicada en la región oriental de Cuba, se considera uno de los territorios del país con mayor potencial hídrico, pero con escasos

recursos hídricos disponibles a partir de la deficiente infraestructura hidráulica existente, y la limitada captación de las aguas superficiales y explotables de aguas subterráneas (Savón & Marzo, 2014).

En la cuenca Guantánamo-Guaso, el recurso hídrico se encuentra sometido en la actualidad a fuertes presiones debido al incremento de la demanda de agua para consumo humano, agrícola e industrial tanto en zonas urbanas como en rurales. La incidencia directa de focos contaminantes y los incrementos de los niveles de sales solubles en las aguas de los acuíferos cársticos por intrusión salina, originadas por causa natural o sobreexplotación, han provocado que los principales acuíferos hayan experimentado un descenso en sus niveles hasta llegar a un estado crítico (Savón & Marzo, 2014).

Ante esta situación, la evaluación y planificación de los recursos hídricos disponibles constituye un reto, pues a medida que las demandas de agua crecen, se incluyen nuevas preocupaciones ambientales, y la gestión hídrica se hace más compleja debido a una tendencia al deterioro de bienes y servicios a nivel de la cuenca. Esta situación crea conflictos al usar los métodos analíticos tradicionales en los enfoques para la administración y gobernanza del agua, con implicaciones en el entendimiento de los roles y funciones de los sistemas hídricos en la sociedad (Heinz, Pulido, Lund, & Andreu, 2007; Segura, 2017), al considerarse que el principal ecosistema fluvial de la cuenca es el río Guaso, un río urbano altamente degradado.

El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial hídrico superficial de la cuenca Guantánamo-Guaso a partir de la evaluación de los

recursos hídricos de las cuencas que la integran y los factores reductores del mismo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca Guantánamo-Guaso, localizada en la región suroriental de Cuba. Limita al norte con las estribaciones meridionales de las montañas de Nipe-Sagua-Baracoa; al este, con la Sierra Maquey; al noroeste, con la llanura del Cauto; al sur, con el mar Caribe, y al suroeste con las estribaciones meridionales de la Sierra Maestra Oriental (GEOCUBA, 2008).

Con una extensión superficial de 2 347.2 km², esta cuenca comprende sectores del municipio Songo La Maya, de la provincia Santiago de Cuba, y la depresión del Valle de Guantánamo en su totalidad, donde se incluyen cinco municipios de la provincia homónima: El Salvador, Manuel Tames, Guantánamo, Caimanera y Niceto Pérez (Figura 1).

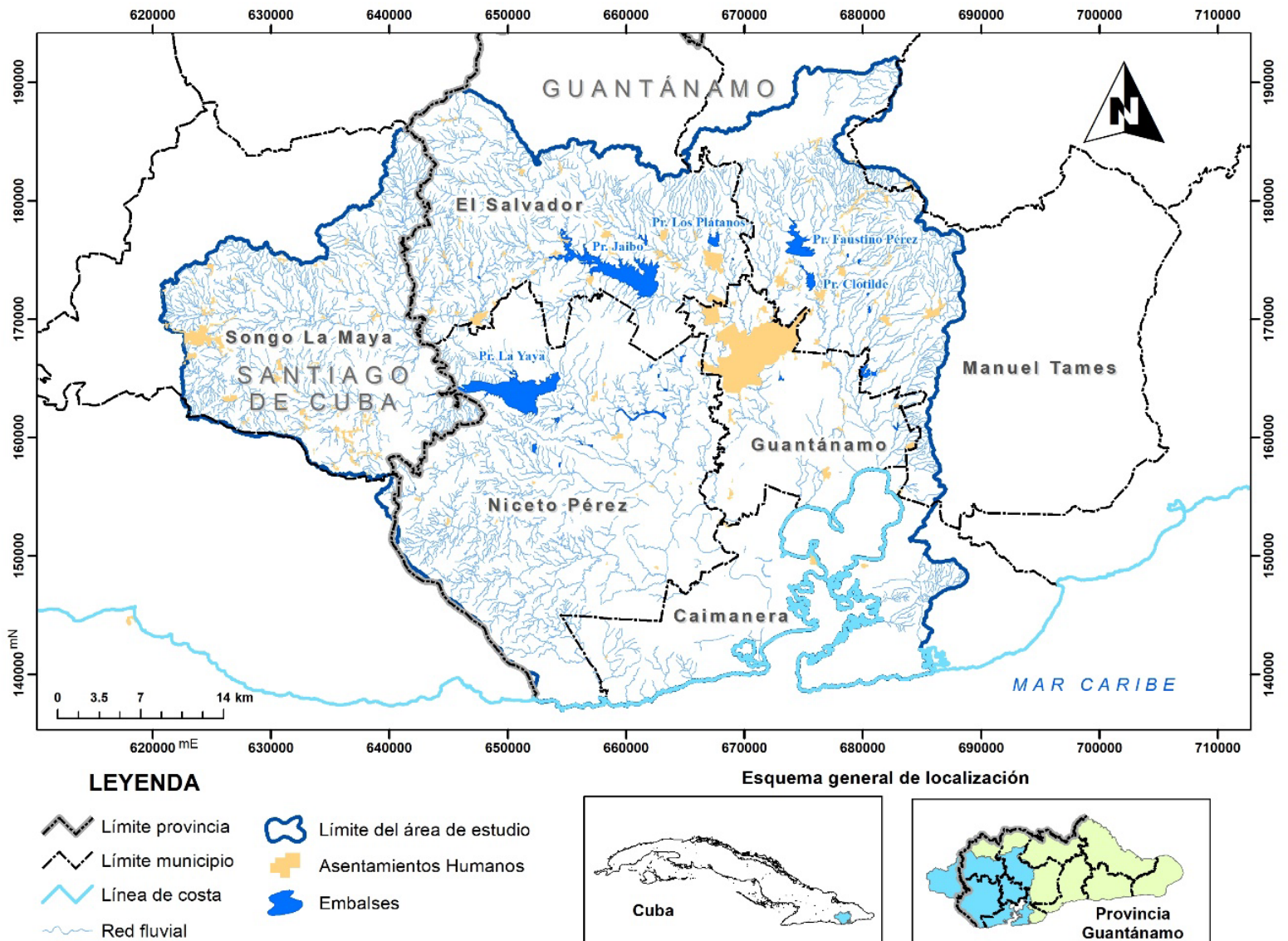


Figura 1. Esquema de localización del área de estudio. Fuente: elaborado por los autores a partir mapa cartográfico digital de Cuba 1:25 000 (GEOCUBA, 2008).

El Consejo Nacional de Cuencas Hidrográfica de Cuba reconoce la cuenca Guantánamo-Guaso entre las cuencas de interés nacional, considerando su complejidad económica, social y ambiental; el grado de afectación de sus recursos naturales; sus características generales, y el conjunto de problemas ambientales que la afectan, al concentrar más del 70 % de la población de la provincia de Guantánamo (Gutiérrez & García, 2015).

Uno de los fenómenos atmosféricos más notables en el área de estudio son las precipitaciones, las cuales presentan una distribución espacial irregular debido a la gran variabilidad climática espacio-temporal de la región, en la que se identifican tres tipos de clima según la clasificación de Köppen: clima tropical lluvioso o de selva tropical (AF); clima tropical de sabana (AW), y clima desértico o de estepa (BS) (Fernández, Baza, & Rojas, 2006).

La red fluvial es amplia y está conformada por 54 corrientes fluviales principales con 1 299 tramos de ríos, arroyos y cañadas. El carácter del relieve determina la dirección del escurrimiento superficial, constituyendo las cadenas montañosas las líneas divisorias de los ríos, que corren a través del valle de Guantánamo, para desembocar en la bahía. Se localizan en el área cinco embalses, los cuales fueron construidos con la finalidad de regular las avenidas de los ríos durante el periodo lluvioso, al tiempo que garantizan el abasto de agua a gran parte de la población que habita en la cuenca, entre otros usos.

Metodología para la delimitación, caracterización morfológica, morfométrica y de la red de drenaje de la cuenca

Para la delimitación y caracterización del área de estudio se partió de la determinación de sus límites geográficos, para lo que se emplean sistemas de información geográfica (SIG) según procedimiento descrito por Zhicay (2020) (Tabla 1). El punto de partida para el análisis y procesamiento de datos lo constituye el modelo digital de elevación (MDE), específicamente de la región oriental de Cuba.

Tabla 1. Procedimiento para delimitar una cuenca de forma automática mediante ARCGIS.

Herramienta	Descripción	Entrada necesaria	Archivo de salida
MDE	Ráster de partida	MDE	MDE
Fill	Corrige el MDE	MDE	MDE corregido rellenando los pixeles vacíos
Flow Direction	Calcula el ráster de dirección del flujo	MDE corregido	Dirección del flujo
Flow Accumulation	Calcula el flujo acumulado en una celda	Dirección del flujo	Acumulación del flujo
Single Output Map Algebra	Calcula el ráster de corrientes a partir de la acumulación del flujo y la especificación de un número de celdas que se quiere que conformen la corriente	Acumulación del flujo	Red de drenaje
Stream Link	Divide los drenajes creados en segmentos continuos a partir del ráster de corrientes y la dirección del flujo	Red de drenaje Dirección del flujo	Drenaje segmentado
Stream Order	Crea un ráster del orden de las corrientes	Red de drenaje Dirección del flujo	Orden de los drenajes
Stream Feature	Crea una forma de drenajes a partir de la dirección del flujo	Red de drenaje Dirección del flujo	Forma de la red de drenaje
Feature vertice to point	Permite determinar los puntos a partir del ráster de corrientes	Forma de la red de drenaje	Vértices de los drenajes
Watershed	Permite la delineación de cuencas	Dirección del flujo de los vértices de los drenajes	

Fuente: Zhicay (2020).

Los resultados obtenidos se rectificaron a partir de la superposición, con información topográfica e hidrológica digitalizada a una escala de 1:25 000, corrigiendo los detalles hidrológicos y topográficos, y determinando los parámetros que explican los efectos dinámicos del comportamiento hidrológico.

Se analizaron los diferentes parámetros de las cuencas para su caracterización hidrológica, utilizando de forma combinada SIG y hojas de cálculo (Excel), en las que se determinaron de forma semiautomática los parámetros a partir de la información hipsométrica, y de los ríos y arroyos obtenidos del procesamiento del MDE.

Se definieron parámetros generales, morfológicos, morfométricos y de la red de drenaje de la cuenca, para lo que se utilizaron los procedimientos y ecuaciones descritos por Cerignoni y Rodríguez (2015), Gutiérrez y González (1986), y Ricce y Robles (2014).

Los parámetros generales determinados fueron los siguientes: área (A_c), perímetro (P) y longitud del cauce principal (L_r). El cálculo se realiza de forma automática mediante medición directa en el SIG.

El coeficiente de compacidad o Gravelius (K_c) es el único parámetro morfológico que se utilizó en esta investigación, el cual define la forma y superficie que abarca la cuenca; tiene influencia sobre la escurrimiento directa y, por tanto, en la marcha y geometría del hidrograma resultante de una precipitación (Flores, 2011; Ortiz-Vera, 2016), mediante la siguiente ecuación:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A_c}} \quad (1)$$

Donde:

P = perímetro de la cuenca (km)

A_c = área de la cuenca (km²)

Para cuantificar el efecto de relieve se determinan los siguientes parámetros morfométricos: altura media de la cuenca (H_m), pendiente media de la cuenca (Y_c) y pendiente media del cauce (Y_r).

El cálculo de la altura media de la cuenca hidrográfica se realizó a partir del procesamiento de los datos de cotas y áreas entre curvas, utilizando hojas de cálculo Excel. Estas áreas se obtienen a partir del procesamiento del MDE de la cuenca en el SIG. Se trabajó con los siguientes rangos, que fueron validados sobre el mapa topográfico: 0-25, 25-50, 50-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500, 500-600, 600-700, 700-800, 900-1 000, 1 000-1 100, 1 100-1 200. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo fueron:

$$Hm = \frac{\sum_{i=1}^n h_i + a_i}{A_c} \quad (2)$$

$$h_i = \frac{c_i + c_s}{2} \quad (3)$$

Donde:

h_i = altura media de la faja "i" (m), equivalente a la semisuma de su cota inferior (c_i) y superior (c_s)

a_i = área parcial de la faja "i" (km^2)

A_c = área de la cuenca (km^2)

La pendiente media de una cuenca se define teóricamente como la pendiente promedio de todas sus laderas fluviales y se considera uno de sus principales indicadores geométricos (Gutiérrez & González, 1986). Su determinación se realiza considerando la definición de fajas altitudinales según el método de Alvord, utilizando un procedimiento basado en el área entre curvas de nivel, y el procesamiento de los datos de cotas y longitud en una hoja de cálculo Excel. Para ello es necesario conocer la longitud total de las curvas de nivel. A través del SIG se generan curvas de nivel a una equidistancia de 25 m. Los cálculos se realizaron mediante la siguiente ecuación:

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n l_i d_i}{A_c} \quad (4)$$

Donde:

l_i = ancho medio de cada faja "i" y equivale a la semisuma de la longitud de nivel (km) que le sirven de límite (km)

d_i = desnivel de la faja "i" dada por la diferencia de alturas (m) entre su cota superior e inferior

A_c = área de la cuenca (km^2)

La pendiente media del cauce se obtiene a partir del desnivel topográfico que se presenta sobre el cauce principal y la longitud del mismo. Se expresa en porcentaje. Al aumentar la pendiente aumenta la velocidad del agua por la red hidrográfica, lo que hace que la cuenca sea más susceptible a procesos erosivos y al arrastre de materiales (Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Denegri, Delgado, & Besteiro, 2012; Ramírez, 2015); se definió a partir del procesamiento de los datos de cota y longitudes parciales y acumuladas, y las ecuaciones correspondientes mediante una hoja de cálculo Excel. Se determinó a través de la relación:

$$Y_r = \frac{\Delta h}{L_r} \quad (5)$$

Donde:

Δh = diferencia de altura entre puntos extremos de la corriente fluvial (m)

L_r = longitud de la corriente fluvial (m)

La densidad de drenaje (D_d) como parámetro de la red de drenaje empleado permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema hidrográfico (Ricce & Robles, 2014). Para su cálculo se parte de la determinación de la longitud (km), de la corriente principal y sus respectivos afluentes empleando herramientas del SIG. Su cálculo se hizo a través de la siguiente ecuación:

$$D_d = \frac{L}{A_c} \quad (6)$$

Donde:

L = sumatoria de las longitudes de todas las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca (km)

A_c = área de la cuenca (km²)

Método para la determinación del potencial hídrico superficial

Para determinar el potencial hídrico superficial de la cuenca Guantánamo-Guaso se aplicó el método de regionalización de caudales. La aplicación de este método es útil para las cuencas que no poseen estaciones hidrométricas, como es el caso estudio. Se basa en la determinación de los parámetros del escurrimiento medio a partir de la dependencia de la escorrentía anual y la precipitación promedio anual de la cuenca tributaria, considerando implícitamente la cantidad, intensidad y distribución de las lluvias en la cuenca, así como otros factores, como las condiciones de humedad precedente, la alimentación subterránea y las extracciones de agua que contribuyen a indefiniciones no explicables (Batista, 1991).

Se determinó primero la lluvia media hiperanual, partiendo del procesamiento de datos de lluvias en el periodo comprendido entre 1991 y 2020 para 60 equipos de la red pluviométrica de la provincia Guantánamo. Se selecciona este periodo en correspondencia con la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), de que los periodos de referencia estándar de 30 años deben actualizarse cada década para reflejar mejor el clima cambiante, y en virtud de lo cual en

reunión de la Comisión de Servicios de la OMM lo recomendó como la nueva base de referencia de 30 años.

Luego se determinó el escurrimiento medio anual de las corrientes fluviales presentes en el área (Batista, 1991), donde la variable módulo del escurrimiento (M_0) está ajustada para periodos de estiaje y de corrientes permanentes, y están definidas sus expresiones para la región oriental de Cuba.

Para los ríos de la región oriental con $P_0 < 1\ 500$ mm y $H_m < 250$ m:

$$M_0 = 0.258P_0^{3.65} * 10^{-10} \quad r = 0.95 \quad (7)$$

Para los ríos de la región oriental con $P_0 > 1\ 500$ mm y $H_m > 250$ m (se cumplan ambas condiciones o una de ellas):

$$M_0 = 2.53P_0^{2.72} * 10^{-8} \quad r = 0.92 \quad (8)$$

Para los ríos que se secan durante cinco meses (diciembre a abril), teniendo en cuenta las mismas condiciones planteadas sobre lluvia y altura media, se aplican las ecuaciones siguientes:

Para los ríos de la región Oriental con $P_0 < 1\ 500$ mm y $H_m < 250$ m:

$$M_0 = 0.178P_0^{3.65} * 10^{-10} \quad r = 0.95 \quad (9)$$

Para los ríos de la región Oriental con $P_0 > 1\,500$ mm y $H_m > 250$ m (se cumplan ambas condiciones o una de ellas):

$$M_0 = 1.75P_0^{2.72} * 10^{-8} \quad r = 0.92 \quad (10)$$

Donde:

M_0 = módulo del escurrimiento ($\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$)

P_0 = lluvia media hiperanual determinada sobre el mapa isoyético (mm)

H_m = altura media de la cuenca (m)

Después se determinó el volumen de escurrimiento medio superficial hiperanual (W_0) expresado en hm^3 según la ecuación:

$$W_0 = Q_0 * t \quad (11)$$

Donde:

$t = 31.54 * 10^6$ segundos en el año

Q_0 = gasto medio expresado en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, el cual se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_0 = M_0 * A_c \quad (12)$$

El volumen de escurrimiento superficial hiperanual obtenido se corresponde con la oferta hídrica total o el potencial hídrico total. Posteriormente se determinaron los factores reductores del mismo, para ello se consideraron dos factores fundamentales según Otaya, Vázquez y Bustamante (2008) los requerimientos ambientales y la calidad de agua.

Finalmente, el potencial hídrico superficial reducido se determinó con base en la ecuación diseñada basada en la alternativa metodológica propuesta por el IDEAM, según la Corporación Autónoma Regional de Nariño (2011):

$$PH_R = PH_T - (PH_T * (R_{RA} + R_{CA})) \quad (13)$$

Donde:

PH_R = potencial hídrico superficial reducido

PH_N = potencial hídrico superficial total ambos expresados en $\text{hm}^3/\text{año}$

R_{RA} = factor de reducción por requerimiento ambiental

R_{CA} = factor de reducción por calidad de agua, ambos expresados en %

Los requerimientos ambientales considerados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba (INRH) en los ecosistemas hídricos lo constituye el caudal sanitario, definido en la Ley 124 de las aguas terrestres de Cuba, en su artículo 45.1, como "el gasto mínimo de estiaje del río en condiciones naturales" (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2017). El caudal sanitario (Q_0) lo establece el INRH y actualiza sobre la base del resultado del estudio del comportamiento de la lluvia, así se

plantea en el artículo 45.2 (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2017). Sobre esta base se determinó el volumen de escurrimiento medio superficial hiperanual a reducir por el factor requerimientos ambientales, para lo cual se consideró el 28 % del escurrimiento medio anual según propone la Dirección de Hidrología e Hidrogeología del INRH, diferenciándolo de esta forma del caudal ecológico (Q_e) definido en la Ley 124 de las aguas terrestres de Cuba, en su artículo 45.3, como "el gasto aguas abajo de las presas y derivadoras, necesario para mantener las funciones ecosistémicas de la corriente y las condiciones de la biodiversidad" (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2017). El caudal sanitario se calculó como:

$$Q_s = Q_0 * 0.28 \quad (14)$$

La evaluación de la calidad del agua se realizó a partir del análisis del comportamiento en los últimos cinco años de diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad de agua establecidos por la Norma Cubana 1021:2014 sobre Higiene comunal-Fuentes de abastecimiento de agua-Calidad y protección sanitaria. Los datos se obtuvieron de la Red de Calidad de Agua (REDCAL), reconocida por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos; para ello se seleccionaron los parámetros para la determinación del índice de calidad de agua superficial (ICA_{sp}), cuyo resultado expresado en por ciento permitió definir el volumen de escurrimiento medio superficial hiperanual a reducir por el factor calidad de agua.

El ICA_{sp} caracteriza la variación espacial y temporal de la calidad del agua. Se aplicó la metodología propuesta por García y Gutiérrez (2015) para el cálculo del ICA_{sp} . Este índice está constituido por cinco variables agrupadas en tres categorías.

1. Cantidad de materia orgánica: determinadas por el porcentaje de saturación del oxígeno disuelto (OD) y la demanda química de oxígeno (DQO₅).
2. Materia bacteriológica: coliformes fecales (CF).
3. Características químicas: concentración de iones hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE).

Debido a que algunas pruebas son más representativas de la calidad de agua que otras, cada variable tiene asignado un peso relativo, representados por W_i ; tales pesos específicos están asignados de acuerdo con las características de los cuerpos de agua localizados en el área de estudio. La siguiente ecuación expresa el cálculo del índice de calidad del agua (García & Gutiérrez, 2015):

$$ICA_{sp} = \sum_{i=1}^n W_i * q_i \quad (15)$$

Donde:

ICA_{sp} = índice de calidad del agua $0 \leq ICA_{sp} \leq 100$

W_i = peso relativo de cada indicador, i $0 \leq W_i \leq 0.3$

q_i = porcentaje de correlación

n = número de variables

La calidad de agua se clasifica como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de la calidad de las aguas superficiales de acuerdo con ICA_{sp} .

Clase	Rango de valores del ICA	Clasificación	Colores
1	90.00-100.00	Excelente calidad	Azul intenso
2	89.99-80.00	Aceptable calidad	Verde
3	79.99-70.00	Medianamente contaminada	Amarillo
4	69.99-60.00	Contaminada	Naranja
5	Menor de 59.99	Altamente contaminada	Rojo

Fuente: García y Gutiérrez (2015).

Una vez determinado el potencial hídrico superficial reducido se procedió a establecer su relación con la demanda de agua total a través del índice de escasez, calculado como:

$$I_E = \frac{D}{PH_R} \quad (16)$$

Donde:

I_E = índice de escasez en %

D = demanda de agua en hm^3

PH_R = potencial hídrico superficial reducido en hm^3

En la Figura 2 se resume la metodología de trabajo utilizada.



Figura 2. Esquema metodológico de la investigación. Fuente: elaborado por los autores a partir de Zhicay (2020), Batista (1991), Otaya, Vázquez y Bustamante (2008).

Resultados y discusión

Características de la cuenca Guantánamo-Guaso

La cuenca Guantánamo-Guaso no es una cuenca hidrográfica sino una cuenca tectónica que a su vez está constituida por 21 cuencas hidrográficas, cada una de ellas con vertimiento directo al mar. Las cuencas delimitadas descargan en la costa sur de la provincia Guantánamo, hacia el mar Caribe; de ellas, siete vierten directamente a la bahía Guantánamo, siendo éstas las correspondientes a los ríos Guantánamo, Guaso, Platanal, Arroyo Hondo, Río Seco, Maquey, y dos arroyos sin nombre (S/N. 3 y S/N. 4) (Figura 3).

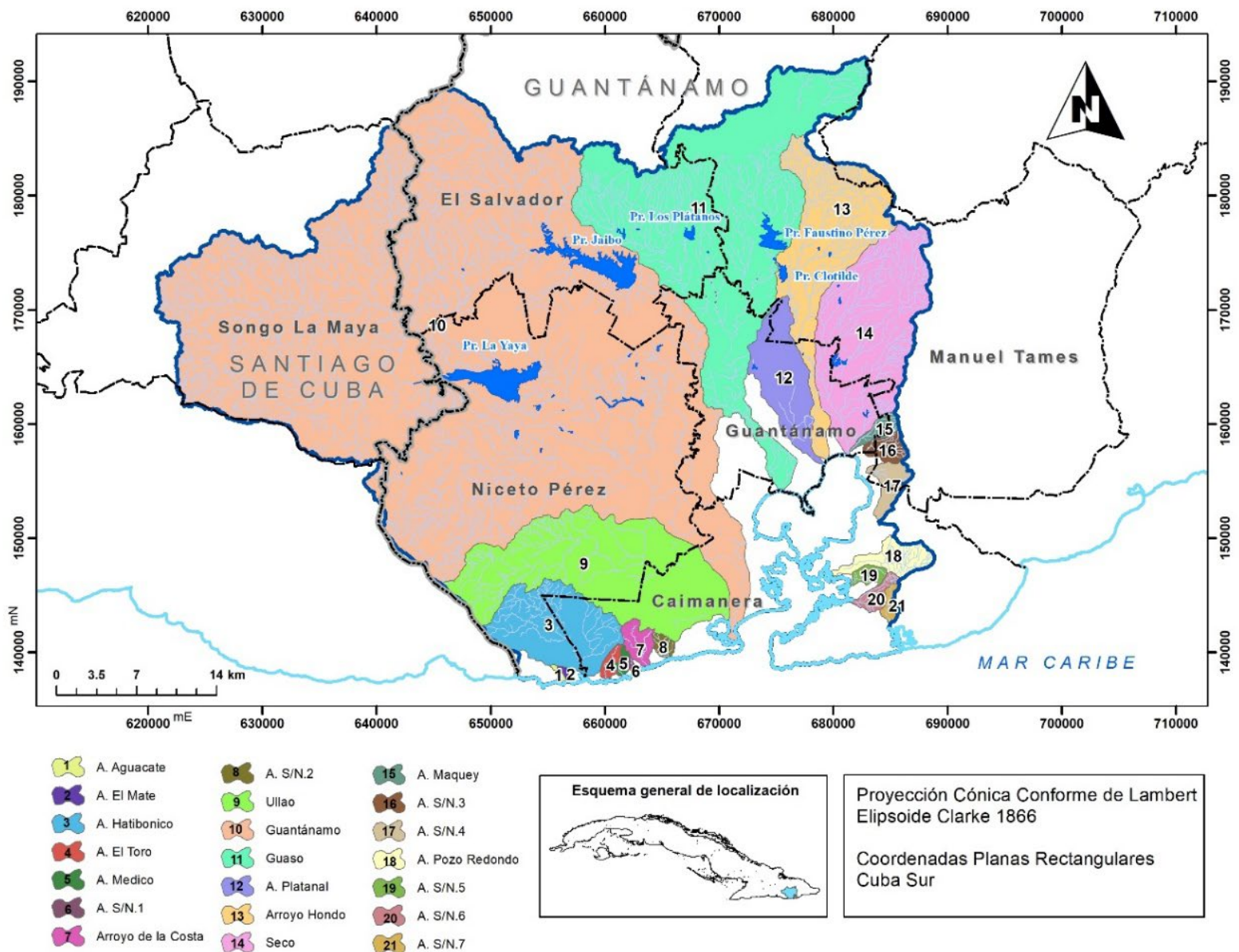


Figura 3. Localización de las cuencas que integran la cuenca de interés nacional Guantánamo-Guaso. Fuente: elaborado por los autores a partir de MDE y su procesamiento en SIG.

Las mayores áreas corresponden a la cuenca Guantánamo con 1 259.00 km², lo que representa el 53.6 % del área total, seguida de la cuenca Guaso, con 328 km², equivalente al 14 %; de ahí la denominación del área de estudio.

La determinación de las características físicas de una cuenca tiene una relación estrecha con el comportamiento hidrológico de la misma (Lux, 2016), por lo que la caracterización de la cuenca está dirigida fundamentalmente a cuantificar diferentes variables que la tipifican, con el fin de establecer la vocación, posibilidades y limitaciones de sus recursos naturales y el ambiente, así como las condiciones socioeconómicas de las comunidades que la habitan (Villatoro, 2019; Zambrana, 2008).

En la Tabla 3 se presentan las principales características de las cuencas delimitadas con cierres sobre la línea de costa.

Tabla 3. Características fisiográficas de los cierres en la cuenca
Guantánamo-Guaso.

Núm	Nombre de la cuenca	A_c (km ²)	P (km)	K_c	H_m (m)	Y_c (‰)	L_r (km)	ΣA_f (km)	D_d (km/km ²)
1	Arroyo Aguacate	0.85	5.02	1.54	171	257.26	2.30	0.90	3.90
2	Arroyo El Mate	0.80	4.57	1.44	72	166.53	1.85	2.00	4.75
3	Arroyo Hatibonico	65.3	38.52	1.35	139	139.76	18.2	98.0	1.78
4	Arroyo El Toro	3.30	8.97	1.39	36	48.45	4.30	3.85	2.47
5	Arroyo Médico	2.10	7.48	1.46	57	66.85	3.45	2.70	2.93
6	Arroyo S/N.1	0.60	3.36	1.22	45	93.31	1.35	1.20	4.25
7	Arroyo de la Costa	7.90	13.59	1.36	72	119.51	4.65	10.6	1.92
8	Arroyo S/N.2	3.10	7.38	1.18	56	82.05	3.05	7.30	3.32
9	Ullao	164.0	78.07	1.72	83	64.56	38.8	155	1.18
10	Guantánamo	1259	217.4	1.73	170	118.26	110	2690	2.22
11	Guaso	328	140.0	2.18	341	93.67	46.0	512	1.70
12	Arroyo Platanal	44.9	37.89	1.60	29	9.22	18.6	40.0	1.30
13	Arroyo Hondo	108.0	78.81	2.14	238	105.56	56.0	224	2.59
14	Seco	133.0	55.12	1.35	145	78.84	27.1	248	2.07
15	Arroyo Maquey	5.45	12.23	1.48	50	75.15	6.00	11.4	3.19
16	Arroyo S/N.3	7.20	12.09	1.27	52	92.57	5.10	13.5	2.58
17	Arroyo S/N.4	10.3	17.01	1.50	60	102.40	5.90	27.0	3.19
18	Arroyo Pozo Redondo	15.4	24.29	1.75	96	123.95	10.5	36.0	3.02
19	Arroyo S/N.5	4.15	9.56	1.32	33	54.69	4.25	8.00	2.99
20	Arroyo S/N.6	5.80	12.87	1.51	49	83.46	5.65	15.1	3.58
21	Arroyo S/N.7	3.45	10.92	1.66	51	83.15	4.70	7.30	3.48

A_c : área de la cuenca; P : perímetro; K_c : coeficiente de compacidad; H_m : altitud media de la cuenca; Y_c : pendiente media de la cuenca; L_r : longitud de la corriente principal; ΣA_f : sumatoria de los afluentes de la corriente principal; D_d : densidad de drenaje.

La evaluación del comportamiento de los diferentes parámetros de las cuencas a partir de sus clasificaciones constituye un aspecto importante para la determinación de los parámetros hidrológicos, pues existe una relación directa entre sus magnitudes y la magnitud de los caudales generados a partir de las precipitaciones registradas. Esta relación ha sido confirmada en estudios realizados por Flores (2012) en cuenca de La Paz en Baja California Sur, México, y por Ortiz-Vera (2015) en sistemas hidrológicos altoandinos en Perú.

Según sus dimensiones, de las 21 cuencas delimitadas (Campos, 1992) 14 fueron muy pequeñas; 5 pequeñas, 1 cuenca intermedia-pequeña y 1 cuenca intermedia-grande. Destacan por su área las cuencas Guantánamo —catalogada como intermedia-grande con más de 500 km² de extensión superficial— y Guaso —que clasifica como intermedia-pequeña, con un área entre 250 km² y 500 km³—, siendo las principales cuencas hidrográficas del área investigada.

En correspondencia con el área de la cuenca (A_c), el perímetro (P) brinda información sobre la forma de la misma. La determinación del coeficiente de compacidad o gravelius (K_c) permite establecer una relación directa con la escorrentía resultante de las precipitaciones, incidiendo en el tiempo de concentración de la cuenca (Lux, 2016). La clasificación e interpretación de estos parámetros según varios autores (Villela & Matos, 1975; Cerignoni & Rodríguez, 2015) permitió identificar dos cuencas casi redondas u ovals-redondas, con alta tendencia a inundaciones; nueve cuencas ovals-redondas a ovals-alargadas, con mediana tendencia a inundaciones; cinco cuencas ovals-redondas a

ovales-alargadas, con baja tendencia a inundaciones; y cinco cuencas alargadas propensas a la conservación.

Esta última clasificación agrupa las cuencas con mayores áreas: Guantánamo, Guaso, Ullao y Arroyo Hondo. Los resultados obtenidos coinciden con Lux (2016), quien planteó que cuanto más se acerca el coeficiente de compacidad a la unidad existe una tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento.

La altura media de la cuenca (H_m) resultó ser un parámetro que incide directamente sobre el clima e influye en el escurrimiento. Sobre ello, Llamas (1993) explica que constituye un dato esencial para el estudio de la temperatura y las precipitaciones. En este caso, se observó una relación entre A_c y H_m , correspondiendo por lo general los mayores valores de altura a las superficies de cuencas más grandes, siendo éstas: Arroyo Hondo, Río Seco, Guaso y Guantánamo.

El análisis de la pendiente media de las cuencas (Y_c), utilizando la clasificación de tipo de relieve aplicada por Consorcio Río Garagoa (2016), distingue un predominio en el área de estudio de un relieve moderadamente inclinado, representado en 12 de las 21 cuencas delimitadas, correspondientes también con las de mayor área. Estos resultados permiten establecer una relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces (Guerra & González, 2002; Tipán, 2018).

La longitud de la corriente principal (L_r) también tiene efectos en la relación precipitación-escurrimiento y por tanto en el comportamiento del recurso hídrico (Aparicio, 1989). En el área destacan por su longitud las

corrientes fluviales principales de las cuencas Guantánamo, Guaso, Arrollo Hondo y Ullao, que se caracterizan también por sus altos valores en el resto de los parámetros evaluados. Estas mismas cuencas destacan entre las de menor pendiente media de la corriente principal (Y_c), según la clasificación utilizada (Consorcio Río Garagoa, 2016).

Por otra parte, el análisis de la red de drenaje permitió confirmar la existencia de una alta densidad (D_d), lo que incide directamente en el comportamiento del escurrimiento a partir de una mayor estructuración de la red fluvial, y determina un mayor potencial de erosión (Ricce & Robles, 2014). Las cuencas más pequeñas resaltan por sus altos valores de densidad dentro del área.

Potencial hídrico de la cuenca Guantánamo-Guaso

Lluvia media hiperanual

En el área de la cuenca tectónica Guantánamo-Guaso, el régimen de precipitaciones disminuye de norte a sur, variando desde 950 mm hasta menos de 500 mm en las partes más bajas, correspondientes al valle de Guantánamo; alcanzan alrededor de los 1 900 mm en las partes más altas, según análisis realizado sobre el mapa isoyético a partir de los datos de lluvias en el periodo 1991-2020, considerando 60 equipos de la red pluviométrica de la provincia Guantánamo (Figura 4).

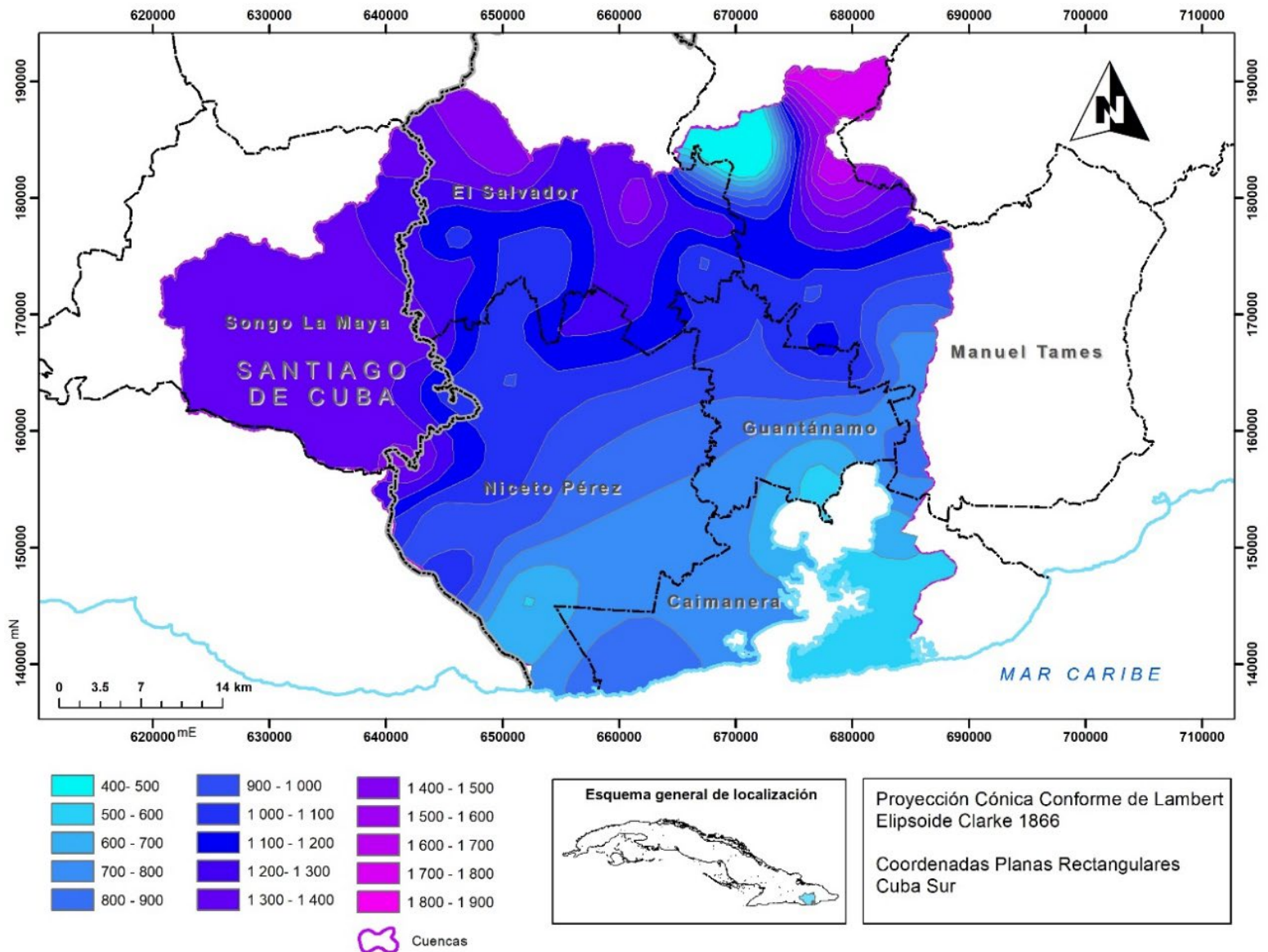


Figura 4. Lluvia media hiperanual de la cuenca Guantánamo-Guaso (1991-2020).

Como se observa en la Figura 5, las variaciones en la distribución de las lluvias se corresponden con el patrón general de circulación

atmosférica que interviene en la provincia Guantánamo, y con los factores locales propios de cada zona. Se registró un incremento progresivo de los valores de precipitación desde la línea de costa hacia el interior, registrándose los mayores valores promedios en las cuencas hidrográficas: Arroyo Hondo con 1 216.0 mm, Guantánamo con 1 153.2 y Guaso con 1 095.1 mm.

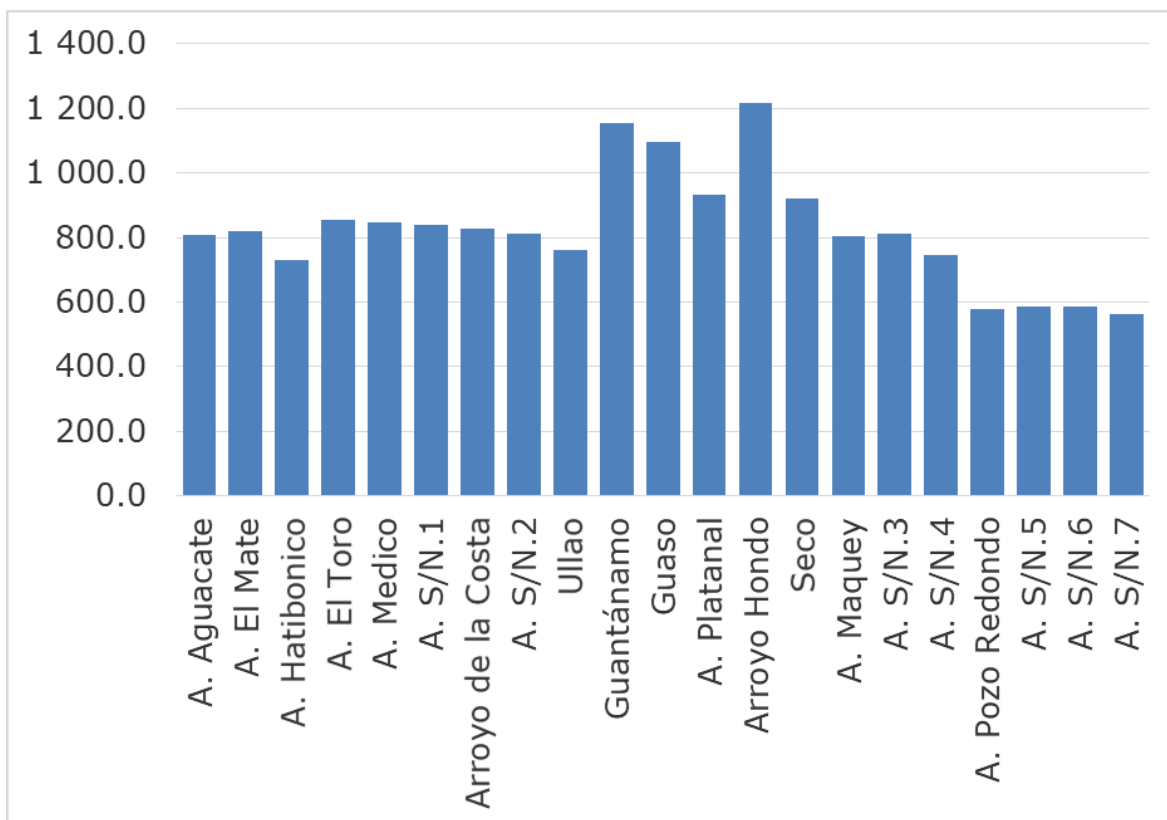


Figura 5. Lluvia media hiperanual por cuencas hidrográficas (en mm).

Escurrimiento medio superficial hiperanual

El análisis conjunto de la incidencia de los diferentes parámetros de la cuenca en la respuesta hidrológica permite evaluar la oferta hídrica de la cuenca a partir del comportamiento del escurrimiento medio. Esta variable hidrológica tiene gran importancia en los estudios del recurso hídrico, pues permite establecer las reservas de las aguas superficiales; la regulación del escurrimiento en distintas cuencas y regiones en general; el número de área de riego, y el mejoramiento del abasto tanto a la población como a la industria. Esta variable se define como el flujo de agua que se mueve por gravedad en la superficie del suelo, según la pendiente del terreno, y ha escapado de la filtración, la evaporación y el almacenaje superficial.

La oferta o potencial hídrico de una cuenca, corresponde al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre. Al cuantificar la esorrentía superficial se está estimando la oferta de agua superficial de la cuenca; y si existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca (Corporación Autónoma Regional de Nariño, 2011).

Entre las dificultades que encuentran los investigadores para la evaluar de la oferta hídrica está la disponibilidad de información hidrológica, ya que la misma en ocasiones no está disponible debido al número limitado de estaciones hidrométricas y el periodo de registro (Lujano, Lujano, & Tapia, 2017). Ante tal situación, la regionalización de caudales constituye uno de los modelos o técnicas utilizadas para suplir

la falta de información hidrológica en lugares con poca disponibilidad de datos (Lujano, Lujano, & Tapia, 2017; Rao & Srinivas, 2006), para ello se realiza la transferencia de información a cuencas sin registro, pero que pertenecen a una misma región hidrológica (Franchini & Suppo, 1996; Nathan & McMahon, 1990).

Los resultados del escurrimiento medio hiperanual para condiciones naturales y sus parámetros se muestran en la Tabla 4. Los mayores volúmenes del escurrimiento medio se concentran en las cuencas hidrográficas Guantánamo, Guaso y Arroyo Hondo, las que concentran en conjunto el 93 % del escurrimiento del área.

Tabla 4. Parámetros del escurrimiento medio hiperanual.

Núm	Nombre de la cuenca	M_o $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$	Q_o l s^{-1}	W_o hm^3
1	Arroyo Aguacate	0.731	0.597	0.019
2	Arroyo El Mate	0.775	0.628	0.020
3	Arroyo Hatibonico	0.728	47.520	1.499
4	Arroyo El Toro	0.888	2.948	0.093
5	Arroyo Médico	0.866	1.829	0.058
6	Arroyo S/N.1	0.830	0.493	0.016
7	Arroyo de la Costa	1.156	9.154	0.289
8	Arroyo S/N.2	0.743	2.318	0.073
9	Ullao	0.849	138.855	4.379
10	Guantánamo	3.869	4 870.491	153.615
11	Guaso	4.682	1 537.115	48.481
12	Arroyo Platanal	1.779	79.819	2.517
13	Arroyo Hondo	4.698	505.758	15.952
14	Seco	1.166	153.689	4.847
15	Arroyo Maquey	0.710	3.859	0.122
16	Arroyo S/N.3	0.740	5.297	0.167
17	Arroyo S/N.4	0.547	5.621	0.177
18	Arroyo Pozo Redondo	0.214	3.287	0.104
19	Arroyo S/N.5	0.228	0.942	0.030
20	Arroyo S/N.6	0.228	1.324	0.042
21	Arroyo S/N.7	0.196	0.673	0.021

M_o : módulo del escurrimiento; Q_o : gasto medio hiperanual; W_o : volumen de escurrimiento medio superficial hiperanual.

El régimen del escurrimiento de los ríos de la cuenca Guantánamo-Guaso mantiene los principales rasgos del régimen hídrico de los ríos de Cuba, donde la variación experimentada por el caudal de las corrientes fluviales está en función de los cambios climáticos estacionales. Para el caso de estudio, la alimentación pluvial constituye un promedio de 75 a 90 % del escurrimiento anual.

Potencial hídrico superficial total y reducido

En la literatura existen varios manuales sobre procedimientos y métodos para determinar la disponibilidad de agua en una cuenca, que se refieren fundamentalmente a la disponibilidad natural del recurso o escurrimientos naturales que se generen en ella (OMM-UNESCO, 1998; UNESCO & PHI, 2006; AG-NWC, 2005), coincidiendo en que una evaluación de la cantidad y calidad del agua disponible constituye prioridad para el desarrollo y administración del recurso hídrico en el marco del desarrollo sustentable (OMM-UNESCO, 1998; UNESCO & PHI, 2006).

Considerando los resultados de la metodología aplicada, el potencial hídrico superficial representado a través del volumen de escurrimiento medio superficial hiperanual en la cuenca Guantánamo-Guaso es de 232.521 hm³ y se corresponde con la suma de los volúmenes de escurrimientos medios anuales determinados en las 21 cuencas que la integran. Este potencial hídrico superficial es reducido tanto por los requerimientos ambientales y como por la calidad de agua.

En cuanto a los requerimientos ambientales evaluados para el área de estudio, se consideró el caudal sanitario, cuyo valor, en correspondencia

con el volumen de escurrimiento medio superficial hiperanual para el caso de la cuenca Guantánamo-Guaso (Tabla 4) asciende a 65.105 hm^3 , reduciéndose el potencial hídrico superficial por este factor a 167.416 hm^3 .

Por su parte, la calidad de agua en la cuenca está influenciada por la alta urbanización presente en el área de estudio, así como por la confluencia de diferentes actividades socioeconómicas generadoras de residuales líquidos que afectan a los cuerpos de agua terrestres. Este factor reductor se relaciona con la alteración de la calidad del agua fundamentalmente por presencia de materia orgánica y químicos. En el área se identificaron 328 fuentes contaminantes de las aguas terrestres asociadas con la localización de despulpadoras de café, industrias, cochiqueras y asentamientos poblacionales, como se muestra en la Figura 6.

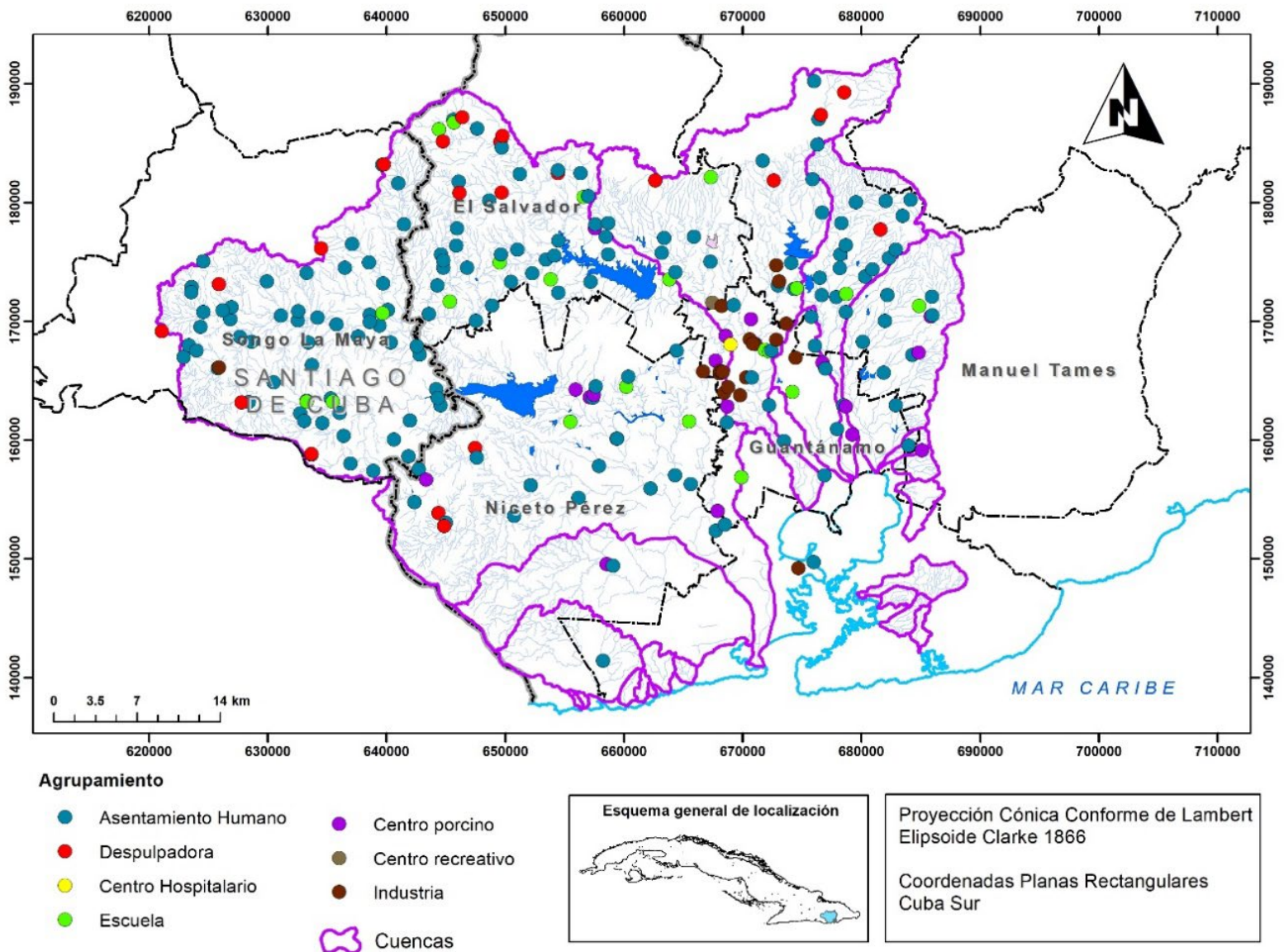


Figura 6. Fuentes contaminantes de la cuenca Guantánamo-Guaso.

La evaluación anual de la calidad del agua del área de estudio (Tabla 5) se realizó considerando los resultados obtenidos para 45 las estaciones

de la REDCAL en el último quinquenio (Figura 7), cuya determinación del ICA_{sp} arrojó los resultados presentados en la Tabla 5, donde se observa que a pesar de existir variaciones anuales en los valores los ICA_{sp} por estaciones, por lo general las diferencias de los promedios para el área de estudio no son significativas ($p \leq 0.05$), con oscilaciones de ± 4 y solo 6 de las 21 cuencas hidrográficas delimitadas cuentan con monitoreo de la calidad del agua.

Tabla 5. Índice de calidad de las aguas superficiales de la cuenca Guantánamo-Guaso 2018-2022.

Núm.	Estación	Cuenca	ICA_{sp} (%)					
			2018	2019	2020	2021	2022	Promedio
1	Ojo de Agua	Ullao	89.49	69.70	67.52	68.15	88.56	76.68
2	Presa Jaibo	Guantánamo	83.78	87.34	86.60	88.09	88.38	86.84
3	Tiguabos	Guantánamo	85.25	70.10	89.58	85.74	67.32	79.60
4	El Güiral	Guantánamo	64.89	83.35	85.98	88.73	66.24	77.84
5	Palizada	Guantánamo	97.00	88.50	85.42	88.59	88.59	89.62
6	San Fernando	Guantánamo	93.13	69.56	70.72	71.74	75.18	76.06
7	Caró 12	Guantánamo	83.85	76.98	90.40	84.55	88.43	84.84
8	Canal Caimanera	Guantánamo	88.62	87.04	87.94	87.28	70.99	84.37
9	El Pozón	Guantánamo	88.65	89.63	86.36	87.97	78.95	86.31
10	Derivadora Guanta	Guantánamo	89.33	89.30	88.01	87.61	86.91	88.23
11	Presa La Yaya	Guantánamo	79.51	88.53	85.88	87.22	88.30	85.89
12	Malabé	Guantánamo	84.25	89.07	87.77	86.36	89.09	87.31

Núm.	Estación	Cuenca	ICA _{sp} (%)					
			2018	2019	2020	2021	2022	Promedio
13	14 Vivienda	Guantánamo	84.54	84.46	66.97	88.19	88.41	82.51
14	La Tontina	Guantánamo	74.35	69.34	66.74	68.40	87.96	73.36
15	Iguanábana	Guantánamo	78.54	92.29	85.51	67.47	84.92	81.74
16	Guantánamo	Guantánamo	82.63	80.71	83.51	77.94	80.26	81.01
17	Guantánamo 1	Guantánamo	83.73	57.52	79.68	78.79	78.74	75.69
18	Guantánamo 2	Guantánamo	82.82	72.58	81.12	59.46	79.71	75.14
19	Guantánamo 3	Guantánamo	64.33	80.44	80.37	59.35	78.54	72.61
20	Ponupo	Guantánamo	78.83	74.39	62.39	78.99	81.05	75.13
21	Presa La Majagua	Guantánamo	80.33	83.18	85.13	64.56	80.82	78.80
22	Majagua	Guantánamo	74.29	81.43	64.32	80.70	82.27	76.60
23	Majagua 1	Guantánamo	81.52	79.75	82.43	77.53	82.44	80.73
24	Ponupo 1	Guantánamo	84.62	79.46	83.52	81.26	59.42	77.65
25	Media Luna	Guaso	87.04	87.70	89.18	88.48	87.35	87.95
26	Tanque el Salvador	Guaso	83.64	88.50	87.33	87.81	77.25	84.91
27	Sempré	Guaso	93.06	89.04	88.45	88.07	87.30	89.18
28	Carrera Larga	Guaso	76.96	88.39	87.90	89.75	88.59	86.32
29	Canal Camarones	Guaso	71.43	80.25	85.01	87.98	87.14	82.36
30	Casa Central	Guaso	70.31	66.43	72.03	67.34	87.15	72.65
31	La Tagua	Guaso	92.64	69.94	74.66	75.94	77.72	78.18
32	Bano	Guaso	60.45	62.96	65.32	71.35	88.29	69.67
33	Presa Los Plátanos	Guaso	80.65	86.38	68.32	87.38	88.41	82.23
34	Confluencia Bano	Guaso	59.49	61.01	65.51	88.26	67.06	68.27

Núm.	Estación	Cuenca	ICA_{sp} (%)					
			2018	2019	2020	2021	2022	Promedio
35	Paraguay	Arroyo Platanal	87.59	86.60	76.06	78.08	83.98	82.46
36	Montgomery	Arroyo Platanal	80.27	85.45	85.95	85.02	88.26	84.99
37	Presa Faustino Pérez	Arroyo Hondo	83.32	88.60	87.12	87.03	87.03	86.62
38	Presa Clotilde	Arroyo Hondo	86.23	88.47	81.45	87.89	88.30	86.47
39	Honduras	Arroyo Hondo	71.12	91.19	77.30	88.03	88.38	83.20
40	La Güira	Arroyo Hondo	98.22	67.15	81.65	88.05	88.66	84.75
41	El Signal	Arroyo Hondo	76.05	86.50	85.80	82.13	88.50	83.80
42	Arroyo Hondo	Arroyo Hondo	58.78	78.65	84.83	83.37	88.65	78.86
43	La Sombrilla	Arroyo Hondo	83.91	67.44	78.01	81.13	88.19	79.74
44	El Yarey	Seco	91.65	74.60	65.30	67.20	90.10	77.77
45	La Dorada	Seco	87.17	64.85	67.73	87.37	88.81	79.18
Promedio			81.29	79.66	79.75	80.94	83.26	80.98

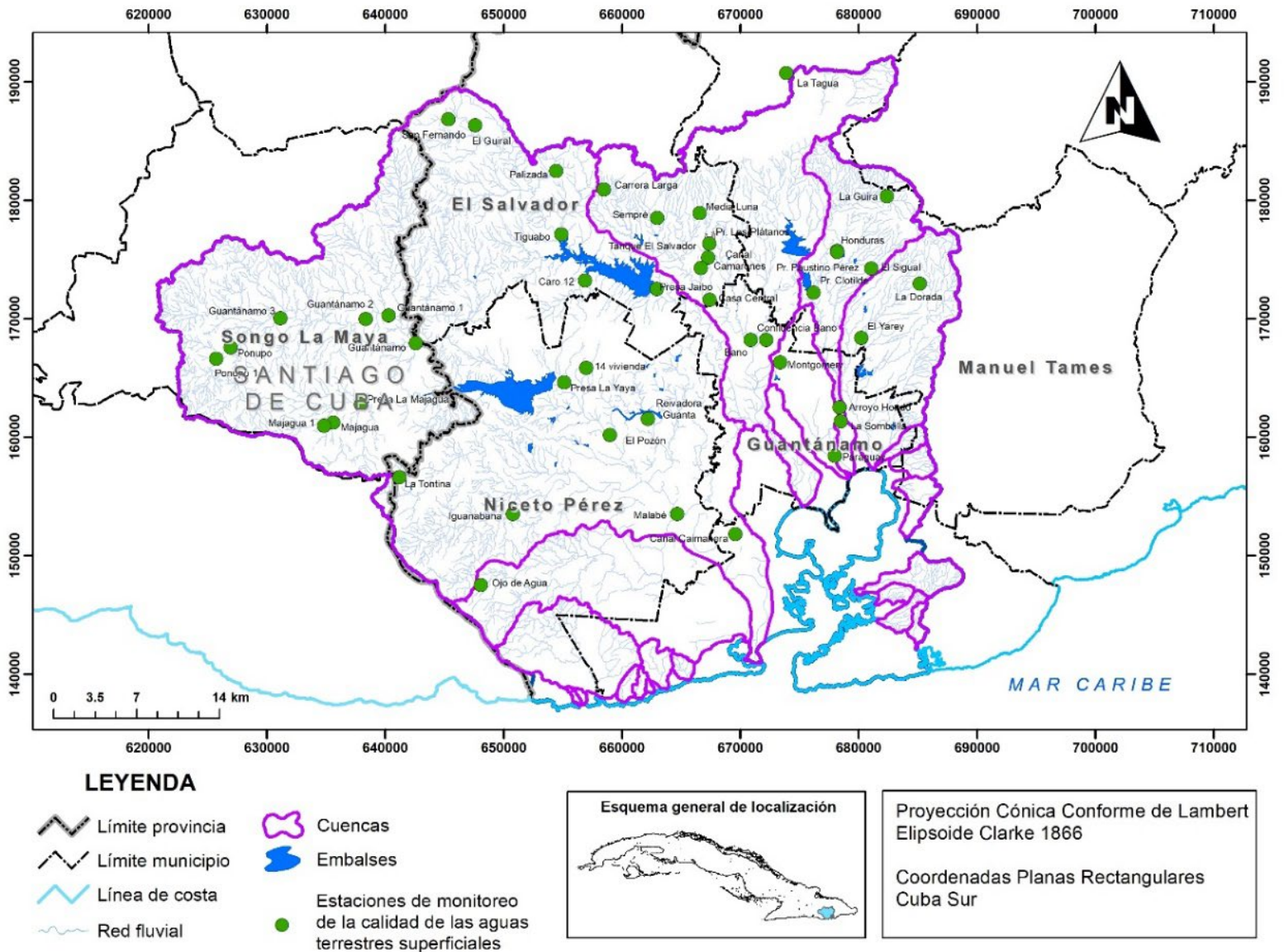


Figura 7. Estaciones de la REDCAL de la cuenca Guantánamo-Guaso.

El ICA_{sp} promedio para el área de estudio es de 80.98 %, siendo la reducción del potencial hídrico por este factor de un 19.02 %. El análisis

diferenciado de las reducciones de potencial para las cuencas que integran el área y están monitoreadas es el siguiente: Ullao (23.32 %), Guantánamo (19.22 %), Guaso (19.83 %), Arroyo Platanal (16.28 %), Arroyo Hondo (16.65 %) y Seco (21.52 %). Para el resto de las cuencas no monitoreadas se asumió el valor promedio general de 19.02 %. Con esto se reducen 44.787 hm³.

Finalmente, el potencial hídrico de la cuenca luego de aplicar estas reducciones sería de 122.629 hm³, lo que representaría el 52.7 % del potencial hídrico total, al reducirse un 47.3 % por los factores antes descritos. En la Tabla 6 se muestran los resultados para cada una de las cuencas delimitadas.

Tabla 6. Oferta hídrica de la cuenca de interés nacional Guantánamo-Guaso.

Núm.	Nombre de la cuenca	Potencial hídrico superficial total (hm ³)	Reducción por caudal ecológico (hm ³)	Reducción por calidad de agua (hm ³)	Potencial hídrico superficial reducido (hm ³)
1	Arroyo Aguacate	0.019	0.005	0.003	0.011
2	Arroyo El Mate	0.020	0.006	0.004	0.01
3	Arroyo Hatibonico	1.499	0.420	0.285	0.794
4	Arroyo El Toro	0.093	0.026	0.018	0.049
5	Arroyo Médico	0.058	0.016	0.011	0.031
6	Arroyo S/N.1	0.016	0.004	0.003	0.009
7	Arroyo de la Costa	0.289	0.081	0.054	0.154
8	Arroyo S/N.2	0.073	0.020	0.015	0.038
9	Ullao	4.379	1.226	1.021	2.132
10	Guantánamo	153.615	43.012	29.525	81.078
11	Guaso	48.481	13.575	9.614	25.292
12	Arroyo Platanal	2.517	0.705	0.409	1.403
13	Arroyo Hondo	15.952	4.466	2.656	8.83
14	Seco	4.847	1.357	1.043	2.447
15	Arroyo Maquey	0.122	0.034	0.023	0.065
16	Arroyo S/N.3	0.167	0.047	0.032	0.088
17	Arroyo S/N.4	0.177	0.050	0.034	0.093
18	Arroyo Pozo Redondo	0.104	0.029	0.02	0.055
19	Arroyo S/N.5	0.030	0.008	0.005	0.017
20	Arroyo S/N.6	0.042	0.012	0.008	0.022
21	Arroyo S/N.7	0.021	0.006	0.004	0.011
Total		232.521	65.105	44.787	122.629

La demanda de agua promedio de los últimos diez años asciende a 144.000 hm³ siendo el principal usuario de la cuenca Guantánamo-Guaso la población cuya demanda representa el 37.2 % debido al alto grado de urbanización de la cuenca, seguido del uso agrícola, que representa un 31.6 %, ya que el área presenta una gran cobertura de suelos destinada para la siembra de cultivos varios y caña fundamentalmente (Figura 8).

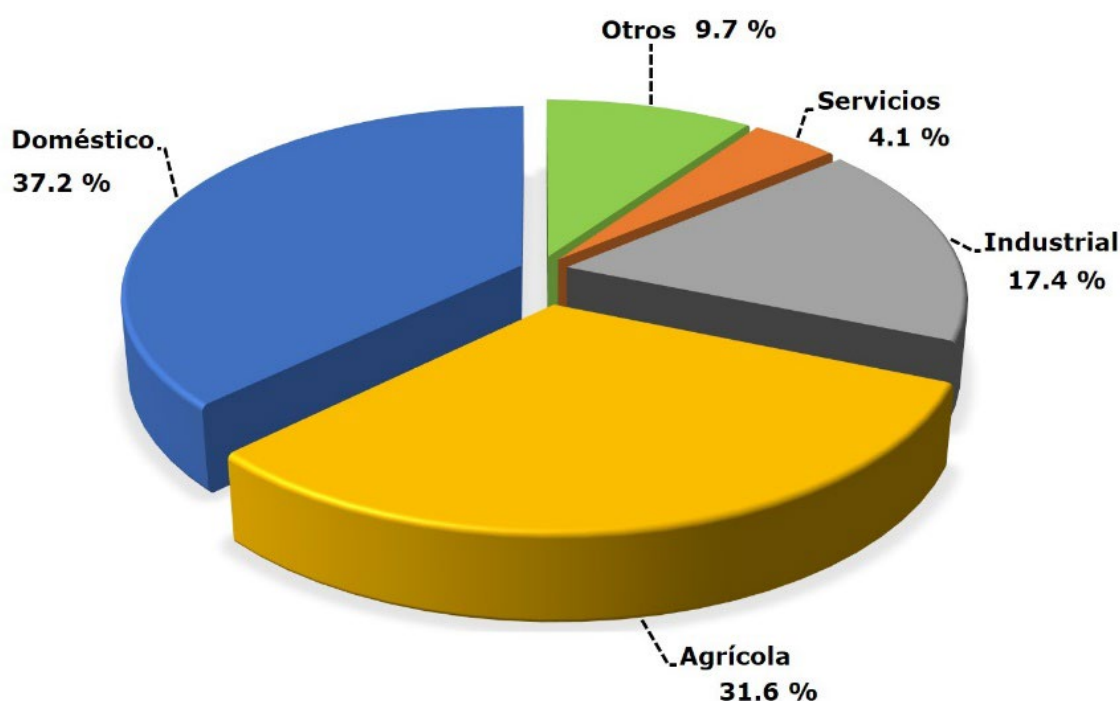


Figura 8. Clasificación de la demanda de agua según usos de la cuenca Guantánamo-Guaso.

De acuerdo con evaluaciones realizadas se determinó que el agua proveniente de ríos y arroyos como fuentes hídricas superficiales se

utilizan principalmente para uso agrícola, pues el agua para consumo doméstico, industrial y de servicios corresponde en su mayoría a volúmenes almacenados en embalses.

Teniendo en cuenta el actual nivel de intervención antrópica existente y su distribución dentro del área de estudio, las condiciones más favorables tanto en calidad como en cantidad de agua del recurso hídrico superficial para su aprovechamiento se encuentra en las partes altas de las cuencas hidrográficas delimitadas, pero principalmente en las de mayor área, coincidiendo con las cuencas Guantánamo, Guaso y Arroyo Hondo.

La correlación entre el potencial hídrico superficial y la demanda de agua total permite evaluar el índice de escasez. Según el IDEAM (2004), la escasez se registra cuando la cantidad de agua tomada de las fuentes existentes es tan grande que se suscitan conflictos entre el abastecimiento de agua para las necesidades humanas, las ecosistémicas, las de los sistemas de producción y las de las demandas potenciales.

Estableciendo esta relación entre la demanda de agua total y el potencial hídrico superficial total se obtienen un índice de escasez de 62 %, lo cual clasifica como alto, según la metodología de índice de escasez de IDEAM (2004), mientras que la relación entre la demanda de agua total y el potencial hídrico reducido arroja un índice de 117 %, también alto. Los resultados obtenidos permiten afirmar que existe fuerte presión sobre el recurso hídrico siendo necesario reordenar la demanda requiriéndose mejorar la eficiencia y productividad, así como el uso racional del agua y el desarrollo de inversiones que favorezcan el uso eficiente de la infraestructura hidráulica.

Conclusiones

Se hizo un análisis del escurrimiento medio hiperanual de las cuencas hidrográficas que integran la cuenca tectónica Guantánamo-Guaso sobreconsiderando el caudal medio anual del río como el potencial hídrico superficial. La información de características físicas del área obtenidas a partir del procesamiento del modelo digital de elevación de la región oriental de Cuba y su corte para la cuenca de estudio, así como los datos de precipitación extraídos del mapa isoyético de precipitaciones medias anuales de Cuba conformaron la base para determinar el potencial hídrico total, que resulta considerablemente reducido (47.3 %), por los requerimientos ambientales y la calidad del agua.

Los resultados indican que en la cuenca Guantánamo-Guaso, la relación oferta hídrica-disponibilidad está limitada no solo por factores que pudieran afectar el recurso hídrico en cantidad sino también en cuanto a su calidad, reconociéndose la necesidad de contar con estudios más detallados en la zona para cuantificar las reducciones de los recursos hídricos disponibles por esta causa, así como el necesario reordenamiento de la demanda de agua a partir del uso racional y productivo del recurso hídrico.

Referencias

- AG-NWC, Australian Water Resources. (2005). A baseline assessment of water resources for national water initiative key findings of the level 2 assessment, water availability theme-national perspective. Australian Government-National Water Commission. Recuperado de http://www.bom.gov.au/water/awra/AWR2005_Level_2_Report_May07-Summary-results.pdf
- Aguirre, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual RESDEMA*, 5(1), 1-20.
- Aparicio, F. J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Balderas, México: Ed. Limusa.
- Asamblea Nacional del Poder Popular. (2017). Ley 124 de las Aguas Terrestres. *Gaceta Oficial de la República de Cuba*, 51, 985-1014.
- Batista, J. L. (1991). Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. *Revista Voluntad Hidráulica*, 85, 2-7.
- Batista, J. L. (2016). Evaluación de los recursos hídricos de Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, 157, 73-83.
- Campos, D. F. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina (México). Recuperado de <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Cerignoni, F. J., & Rodríguez, V. A. (2015). Análisis morfométrico de la microcuenca "C" núcleo Cuhna, Sao Paolo, Brasil. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 41, 355-366.

- CITMA, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba. (2016). Estrategia ambiental nacional 2016-2020. Recuperado de <https://www.citma.gob.cu/estrategia-ambiental-nacional/>
- Consorcio Río Garagoa. (2016). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica. Fase de Diagnóstico. Pendientes (pp. 5-10). Recuperado de <https://www.car.gov.co/uploads/files/5c1a9ff24fef0.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño. (2011). Plan de ordenamiento del recurso hídrico Quebrada Miraflores. Recuperado de <https://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp3.pdf>
- Fernández, A., Baza, R., & Rojas, L. G. (2006). Evaluación climática de la cuenca Guantánamo-Guaso para el monitoreo y la alerta temprana de los incendios forestales. *Revista Forestal Baracoa*, 25(2), 101-107.
- Flores, M. (2012). Análisis y comparación de metodologías de ordenación de cuencas hidrográficas. Aplicación a la cuenca de La Paz en Baja California Sur, México (tesis de maestría), Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/19233>
- Flores, M. A. (2014). Gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca hidrológica del río Papagayo, estado de Guerrero (tesis de doctorado), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Flores, M. Z. (2011). Análisis y comparación de metodologías de ordenación de cuencas hidrográficas. Aplicación a la cuenca de La Paz en Baja California Sur, México. Recuperado de <https://m.riunet.upv.es/handle/10251/19233?show=full>
- Forero, K. P., & Mosquera, J. (2014). La cuenca como unidad de planificación sostenible. *Revista Ambiental Aire, Agua y Suelo*, 5(2), 1-13.
- Franchini, M., & Suppo, M. (1996). Regional analysis of flow duration curves for a limestone region. *Water Resource Management*, 10, 199-218.
- García, J. M., & Gutiérrez, J. B. (2015). Un índice para evaluar la calidad de los recursos hídricos superficiales en cuencas hidrográficas. *Revista Voluntad Hidráulica*, 113, 7-15.
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Saucve Grande. *AUGM DOMUS*, 4, 143-158. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476>
- GEOCUBA. (2008). Diagnóstico ambiental de la cuenca Guantánamo-Guaso. La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- González, J. I. (2017). Estudios ambientales en cuencas. El manejo de cuencas en Cuba: actualidades y retos. México, DF, México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/452/gonzalez.html>

- González, M., Arzate, M., & Guerrero, A. A. (2016). Gestión integral de cuencas hidrográficas: una alternativa a la sustentabilidad de los recursos hídricos en México. *Lacandonia*, 10(1), 91-98.
- Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 88-108.
- Gutiérrez, J. B., & García, J. M. (2015). La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba. Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas. La Habana, Cuba.
- Gutiérrez, J. E., & González, J. I. (1986). Manual de clases prácticas de hidrología general. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.
- Heinz, I., Pulido, M., Lund, J., & Andreu, J. (2007). Hydro-economic modeling in river basin management: Implications and applications for the European water framework directive. *Water Resources Management*, 21(7), 1103-1125. DOI: 10.1007/s11269-006-9101-8
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2004). Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021143/metodologia-calculo.pdf>
- Jouravlev, A. (2009). Acuerdos internacionales para la gestión integrada de cuencas: oportunidades y limitaciones para su implementación. Concepción Chile. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.

- Llamas, J. M. (1993). Hidrología general. Principios y aplicaciones. Bilbao. España: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- Lujano, A., Lujano, E., & Tapia, B. (2017). Regionalización de caudales mensuales en la región hidrográfica del Titicaca, Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 19(2), 219-230.
- Lux, B. (2016). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas. Guatemala, Guatemala: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/35294551.pdf>
- Martínez, Y., & Villalejo, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. *Journal of Hydrology*, 121, 217-238.
- OMM & UNESCO, Organización Meteorológica Mundial & Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1998). Evaluación de los recursos hídricos. Manual para la estimación de capacidades nacionales. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4855
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (1992). Declaración de Dublín e informe de la conferencia. Recuperado de <https://gestion sostenibledelagua.files.wordpress.com/2014/07/1992-declaracion-de-dublin-sobre-el-agua-y-el-ds.pdf>

- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2018). Informe de Síntesis de 2018 sobre el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 relacionado con el agua y el saneamiento. Resumen ejecutivo. Recuperado de https://www.unwater.org/app/uploads/2018/05/UN-Water_SDG6_Synthesis_Report_2018_Executive_Summary_SPA.pdf
- Ortiz-Vera, O. (2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 25-44.
- Otaya, L. A; Vásquez, G. L; Bustamante, G. (2008). Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 61 (1), 4366-4380. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179914077013>
- Ramírez, J. L. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Piurra. Provincia de Imbadura, Ecuador. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
- Rao, A. R., & Srinivas, V. V. (2006). Regionalization of watersheds by hybrid cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318, 37-56.
- Ricce, M. G., & Robles, K. B. (2014). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos superficiales y estrategias de gestión sostenible en la microcuenca Río Negro-Stipo (tesis de grado), Universidad Nacional del Centro de Perú, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3985>

- Rojas, J. H., Pérez, M. A., Fabrício, T. F., Madera, C. A. C. A., Guimarães, M., & Dos Santos, R. (2013). Análisis comparativo de modelos e instrumentos de gestión integrada del recurso hídrico en Suramérica: los casos de Brasil y Colombia. *Ambiente & Água. An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(1), 73-97. DOI: 10.4136/ambi-agua.971
- Savón, N. J., & Marzo, Y. (2014). Actualización del Potencial hídrico de la provincia Guantánamo (inédito). Santiago de Cuba, Cuba: Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos.
- Segura, F. J. (2017). Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática. Guadalupe de Maciascoque, España: Universidad Católica de Murcia.
- Terán, J. F. (2018). La cuenca como unidad de gestión y planificación. Quito, Ecuador: Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas (CESA), Consorcio CAMAREN. Recuperado de http://cesa.org.ec/wp-content/uploads/2018/07/la_cuenca_como_unidad_de_gestion.pdf
- Tipán, D. N. (2018). Estudio hidráulico del río Guano para la determinación de la conductancia entre río-acuífero y zonas de inundación. Riobamba, Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo. Recuperado de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4983>

UNESCO & PHI, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura & Programa Hidrológico Internacional. (2006). Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas (Documento Técnico del PHI-LAC, No. 4). Recuperado de <http://www.unesco.org/>

Villatoro, J. R. (2019). Caracterización morfométrica de la subcuenca del río Chitá. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/12336/1/TRABAJO%20DE%20GRADUACION%20--%20JAIRO%20RAFAEL%20VILLATORO%20COX.pdf>

Villela, S. M., & Matos, A. (1975). Hidrología aplicada. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill do Brasil. Recuperado de <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/villela-s-m-matos-a-hidrologia-aplicada-caps-1-2-e-3.pdf>

Zambrana, Y. Y. (2008). Plan de manejo y gestión de la subcuenca del río San Francisco (tesis de grado), Universidad Nacional Agraria Matagalpa. Recuperado de <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/1121>

Zhicay, J. (2020). Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, Cantón Gualaceo. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana-Cuenca. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18364>