

La componente subterránea en el balance hídrico de la cuenca cubana San Juan

Katia Luisa del Rosario Rodríguez e-mail: katia.rosario@mtz.insmet.cu
Centro Meteorológico Provincial. Matanzas. Cuba.

Viera Petrova Nicolaevna e-mail: vierapetrova70@yahoo.com
Centro Meteorológico Provincial. Matanzas. Cuba.

Haydée Llanusa Ruiz e-mail: hllanusa@tesla.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Armando Hernández Valdés e-mail: armando@cih.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

RESUMEN

La cuenca San Juan la conforman las subcuencas San Agustín, Cañas y San Juan. El balance simple de la subcuenca San Agustín - Cañas, con un área de 267 km², arrojó que para que exista el balance hiperanual de 428,6 hm³, la subcuenca debe tener un área adicional de unos 55 km², la cual genere un aporte adicional de 30,5 hm³ a la escorrentía de la cuenca y se considera que corresponde a un aporte subterráneo significativo. Para comprobar esta hipótesis, se estimó la componente subterránea por diferentes métodos, concluyéndose que el aporte adicional está generado por la infiltración de las precipitaciones que ocurre en el área del polje y la zona cársica existente en la cuenca Aguacate al oeste de la subcuenca San Agustín – Cañas.

Palabras clave: aporte subterráneo, balance hídrico, carso, escurrimiento base, manantiales.

The groundwater component in the water balance in San Juan Cuban catchment

ABSTRACT

The San Juan catchment is form up of San Agustín, Cañas and San Juan sub-catchment. The simple balance of San Agustín sub-catchment, with an area of 267 km², showed that for the hipper-annual balance of 428,6 hm³ to exist, the sub-catchment must have an additional area of about 55 km², which generates an additional contribution of 30,5 hm³ to runoff from the basin and is considered to correspond to a significant groundwater contribution. To verify this hypothesis, the groundwater component value was computed by different methods concluding that the additional contribution is given by the value of groundwater component, which is generated by the infiltration of rainfall that occurs in the polje area and the karst zone existent in Aguacate catchment at west of San Agustín - Cañas sub-catchment.

Keywords: groundwater contribution, water balance, karst, base run-off, spring flow.

INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica San Juan, siempre ha sido objeto de estudio por su potencial hídrico y la importancia de su uso en el desarrollo económico de la región. Dado la estrecha vinculación que existe en la cuenca entre los recursos de aguas superficiales y subterráneas, identificada en estudios anteriores, el área de estudio la definen los límites de las cuencas hidrográficas superficiales Aguacate y San Juan, se encuentra localizada al noroeste de la provincia de Matanzas y noreste de la provincia Mayabeque, entre las coordenadas planas 407500m a 447500m Este y 339000m a 361000m Norte del sistema Cuba Norte y abarca un área de 505,6 km², limita al Norte con la Sierra de Camarones y las Lomas de Galindo, Yumurí y Estero, al Sur con las elevaciones de las alturas Madruga – Coliseo, al oeste con los poblados de Madruga y Aguacate y al Este con los poblados de Cidra y Matanzas (figura 1).

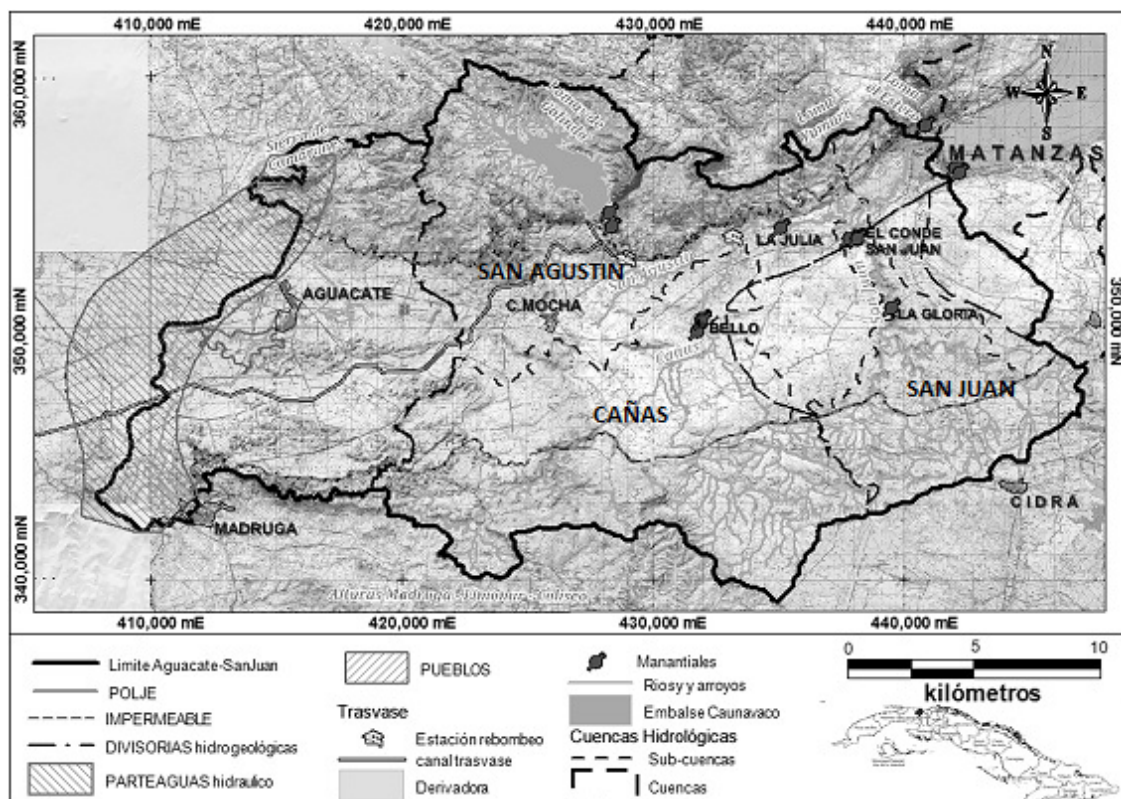


Figura 1. Ubicación de las cuencas hidrográficas Aguacate y San Juan y las subcuencas San Agustín, Cañas y San Juan

La cuenca San Juan está constituida por las subcuencas de los ríos San Agustín, Cañas y San Juan, con un área tributaria de 372 km²; la subcuenca San Agustín - Cañas tiene un área de 267 km² y la subcuenca San Juan 105 km² (Del Rosario et al. 2011). La cuenca tiene una forma casi cuadrada, limita al norte con la cuenca hidrológica del río Yumurí, al sur con el parteaguas hidrológico de las vertientes norte-sur, al este con las cuencas hidrológicas de los ríos Bueyvaca y Canimar y al oeste con la cuenca Aguacate. Geológicamente la cuenca está formada casi completamente por calizas cársicas, las potentes salidas de manantiales como Bello en el río Cañas y La Gloria en el San Juan indican el desarrollo cársico en la cuenca.

La cuenca Aguacate se considera endorreica con un área de tributaria de 123 km², en la que los arroyos intermitentes que nacen al sur descargan en el polje que se encuentra al suroeste del poblado de Aguacate y los que nacen en las elevaciones del noreste desaparecen al llegar a zonas más bajas. La subcuenca es delimitada teniendo en cuenta por criterios del relieve, pero conociendo que uno de los límites hidrogeológicos en la misma es un partearguas hidráulico, su extensión puede determinarse en el orden de los 145 km².

Los recursos de las aguas superficiales se concentran en los escurrimientos del gran sistema fluvial San Agustín–Cañas–San Juan. La formación del escurrimiento y sus caudales se encuentran en una estrecha interrelación con el manto subterráneo y la geología del territorio.

En esta cuenca se encuentra el sistema de trasvase de agua superficial Matanzas-Mayabeque, puesto en marcha en el año 2008, construido para trasvasar durante el periodo húmedo, un volumen de 64.97 hm³ para un año medio, con el objetivo de suplir la demanda de agua del desarrollo agrícola de la provincia de Mayabeque, que a su vez es el principal abastecedor de viandas y hortalizas de la provincia La Habana, capital del país. La extracción del escurrimiento superficial se realiza con dos bombas de 1.5 m³/s y 1.0 m³/s en la derivadora San Agustín I y se envía hacia la derivadora Pedroso a través de la Presa Caunavaco y de la derivadora San Agustín III, para suplir el déficit que se presenten en los sistemas de riego de la región de Mayabeque, previa entrega de agua a aquellos usuarios que reciben el agua directamente del Trasvase.

Según los análisis de los datos de observaciones de las estaciones hidrométricas realizados y la descripción detallada de varias investigaciones (Del Rosario et al. 2011), (Del Rosario 2013), la cuenca hidrológica San Juan representa una excepción en comparación con otros ríos de la provincia, expresada en el elevado valor del escurrimiento base anual, el módulo del escurrimiento hiperanual (M) para la cuenca es de 17,6 L/s km², con un coeficiente de variación (C_v) de 0,16 por la estación San Agustín III y $M = 15,6$ L/s km² y $C_v = 0,23$ por la estación San Juan, siendo el módulo para el resto de los ríos de 8-9 L/s km². Lo caracteriza la poca diferencia entre los gastos promedios de los periodos húmedo y seco y menor cantidad de los picos de avenidas, de 10 a 13, a diferencia de 20-25 en el resto de los ríos. Aunque para el clima tropical marítimo de la isla y provincia, la única fuente de los recursos hídricos superficiales y subterráneos son las precipitaciones, para esta cuenca, a las avenidas provocadas por las lluvias del periodo húmedo, no les corresponde el papel principal dentro de la formación del escurrimiento anual.

Dada la importancia de planificar la entrega del recurso superficial de la cuenca en los eventos de sequía, se hace necesario realizar el balance hídrico de la cuenca y teniendo en cuenta las particularidades de formación del escurrimiento de la cuenca San Juan y su distribución interanual y por periodos estacionales (del Rosario et al. 2013), se hace referencia a la subcuenca San Agustín - Cañas en el cierre de la estación hidrométrica San Agustín III, pues el trasvase tiene relación directa con esta porción del área.

Para la subcuenca San Agustín – Cañas se realizó un balance simple para un período hiperanual. La solución de esta ecuación de balance hídrico requiere de la estimación de toda una serie de variables físicas intermedias. En este caso se utilizó la ecuación de Budyko por ser la más simple de las metodologías conocidas.

$$P = E + Y \pm \Delta V \quad (1)$$

donde:

P – precipitación en mm, 1491 mm promedio para la cuenca de estudio

E – evapotranspiración desde la superficie de la cuenca, en mm, 1050 mm (según Budyko y el Esquema Regional Precisado ERP)

Y – lámina de escorrentía en mm, que equivale al volumen de escorrentía hiperanual

$W_0 = 148,2 \text{ hm}^3$ y un módulo de escurrimiento $M = 17,6 \text{ L/s km}^2$ según la serie de observaciones

ΔV – exceso o déficit, este valor en un período hiperanual debe ser igual a cero, cuando se trata de un balance en equilibrio

Para expresar el balance hídrico en volúmenes de hm^3 , se convierten las unidades de mm de la precipitación y de la evapotranspiración a hm^3 , teniendo en cuenta el área de la subcuenca de 267 km^2 :

$$P = (1491 \times 267) / 1000 = 398,1 \text{ hm}^3$$

$$E = (1050 \times 267) / 1000 = 280,4 \text{ hm}^3$$

$$Y = 148,2 \text{ hm}^3; M = 17,6 \text{ L/s km}^2$$

Al sustituir los valores en la ecuación 1 y se despeja la variable ΔV , se obtiene que:

$$398,1 = 280,4 + 148,2 \pm \Delta V$$

$$398,1 = 428,6 \text{ hm}^3 \pm \Delta V$$

$$\Delta V = - 30,5 \text{ hm}^3$$

Esta diferencia, o sea este déficit del volumen, indica:

- Que existe un aporte adicional a la escorrentía de la cuenca, que debe estar relacionado con el aporte significativo de la componente subterránea existente en el territorio.
- Para que exista el balance en término hiperanual, la cuenca hidrográfica de San Agustín, con un área de 267 km^2 determinada por el parteaguas, debe tener un área adicional de 55 km^2 como se indica en la ecuación 2.

$$A = \Delta V / M \quad (2)$$

$$A = 30,5 \text{ } 10^9 \text{ L} / 17,6 \text{ L/s km}^2 * 31,54 \text{ } 10^6 \text{ s (para un año)}$$

$$A = 30,5 * 1000 / 17,6 * 31,54 \text{ km}^2$$

$$A = 55 \text{ km}^2$$

Dado estos resultados el objetivo del presente estudio estuvo en determinar si el aporte adicional se debe a la componente subterránea e identificar y comprobar el área de aporte de la misma.

METODOLOGÍA

El aporte subterráneo, se determinó por dos métodos:

1. En función del escurrimiento base, calculado a partir de los hidrógrafos del valor mínimo anual; por los valores mínimos mensuales y como el valor mínimo diario por mes, para años de distintas acuosidades, según las probabilidades de precipitaciones anuales determinadas en estudio anterior (Del Rosario et al. 2015).

2. Por los valores obtenidos en los aforos de corriente realizados en el territorio (Cuéllar et al. 2011).

El área adicional se identificó a partir del análisis de los resultados de las investigaciones de la interrelación hidráulica entre las cuencas Aguacate y San Juan, realizadas durante los años 1960-1986 y 2011-2012.

DETERMINACIÓN DE LA COMPONENTE SUBTERRÁNEA Y DEL APOORTE ADICIONAL AL ÁREA DE ESTUDIO

Componente subterránea en la distribución del escurrimiento a partir de los hidrógrafos

Para los ríos de Cuba con el clima tropical marítimo, el escurrimiento mínimo se puede considerar como el escurrimiento base, el cual corresponde al aporte de las aguas subterráneas. El escurrimiento base depende de muchos factores, entre los principales están: los tipos de suelos, la vegetación, la geología subyacente, el tamaño de la cuenca colectora, la profundidad de los cauces, la profundidad y los recursos del manto subterráneo y la cantidad de las precipitaciones caídas. Pero, no siempre para la misma cantidad de las precipitaciones y el mismo tamaño y la cercanía de las cuencas, el escurrimiento base es el mismo, pues la influencia de profundidad del manto y de los cauces ejercen mayor influencia.

La red fluvial principal de la cuenca San Juan está compuesta por tres principales ríos: San Agustín, Cañas y San Juan. Los recursos de las aguas superficiales se concentran en los escurrimientos del gran sistema fluvial San Agustín – Cañas – San Juan. La formación del escurrimiento y sus caudales se encuentran en una estrecha interrelación con el manto subterráneo y la geología del territorio. En estos ríos se observa la presencia de gran número de los manantiales, que salen en los bordes y fondos de los cauces, constituyendo las fuentes que mantienen un escurrimiento considerable y permanente durante todo el año. Estos ríos constituyen un caso excepcional en el régimen de escurrimiento de los ríos de Cuba y presentan una marcada influencia positiva del carso en su régimen de alimentación, lo que se refleja en los elevados valores del escurrimiento base (la componente subterránea), para las subcuencas San Agustín – Cañas que varían en orden de 110 hm^3 a 135 hm^3 (Del Rosario et al. 2011).

El aporte subterráneo, que cumple la función del escurrimiento base de los hidrógrafos anuales, los cuales se confeccionan por los datos diarios o mensuales, se puede determinar por varios métodos, que se utilizan en dependencia de la exigencia en la seguridad de la determinación de este valor: por el valor mínimo anual; por los valores mínimos mensuales o como el valor mínimo diario por mes.

A continuación, se presenta el análisis de los valores de aporte subterráneo en el cierre de la estación hidrométrica San Agustín III para la subcuenca San Agustín – Cañas, en la cual tienen surgencia los manantiales Bello, principal descarga de las aguas subterráneas.

Río San Agustín

En la figura 2 se representa el comportamiento de los gastos mensuales promedios y mínimos de los 28 años de observación en la estación San Agustín III, donde se puede apreciar que la variación de los gastos mínimos mensuales ($Q_{\text{min mensual}}$) está en el rango de $6,05 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2,31$

m^3/s y el gasto promedio es de $3,88 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor mínimo del periodo de observaciones ocurrió en el mes de abril del 1990.

De las series de observación, se seleccionaron los años húmedos, medios y secos, según las probabilidades de las precipitaciones anuales y el escurrimiento, para las cuales se confeccionaron los hidrógrafos.

El gasto mínimo diario observado en el año hidrológico húmedo 1978-79 (figura 3), fue de $3,19 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual constituye un volumen de $100,6 \text{ hm}^3$, o sea 60% del escurrimiento anual. El escurrimiento base calculado como el promedio de los gastos mínimos mensuales para el año húmedo analizado es de $3,85 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a un volumen de $121,4 \text{ hm}^3$, el cual representa el 73,9% del total anual.

El comportamiento de los gastos para el año medio 1988 – 1989 (figura 4), difiere algo de un año húmedo, presentando las avenidas solamente en el periodo lluvioso. El gasto mínimo diario de $2,71 \text{ m}^3/\text{s}$ representa el 57,3% del promedio anual. El escurrimiento base calculado como el promedio de los valores mínimos mensuales es de $3,60 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a un volumen de $113,5 \text{ hm}^3$, el cual representa el 76% del promedio anual.

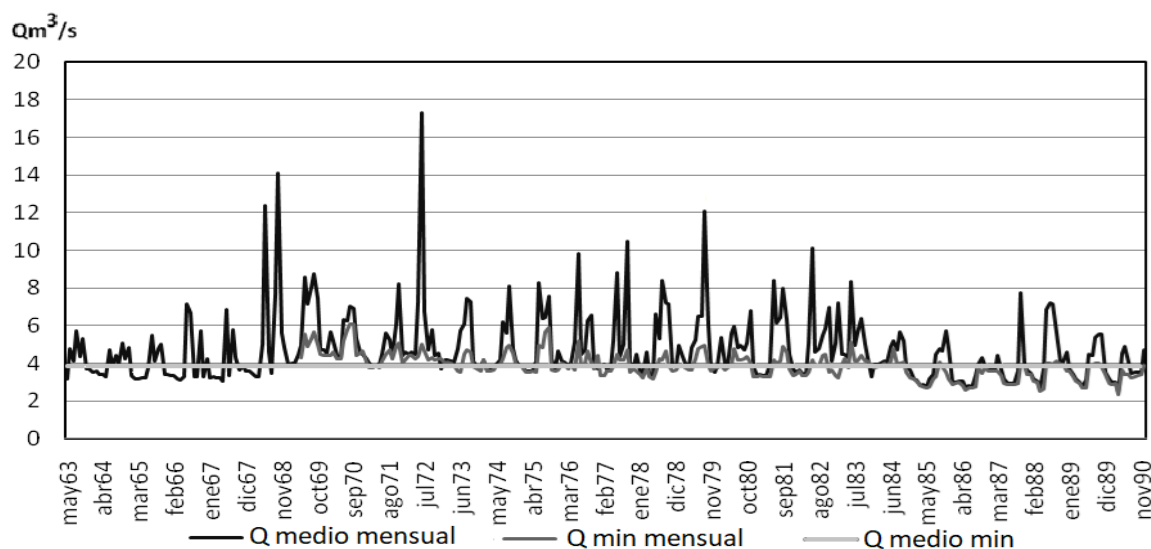


Figura 2. Comportamiento de los gastos mensuales promedio (*Q medio mensual*) mínimo (*Q min mensual*) y el gasto medio de los mínimos mensuales (*Q medio min*) de la serie 1963 – 1990 en la estación San Agustín III.

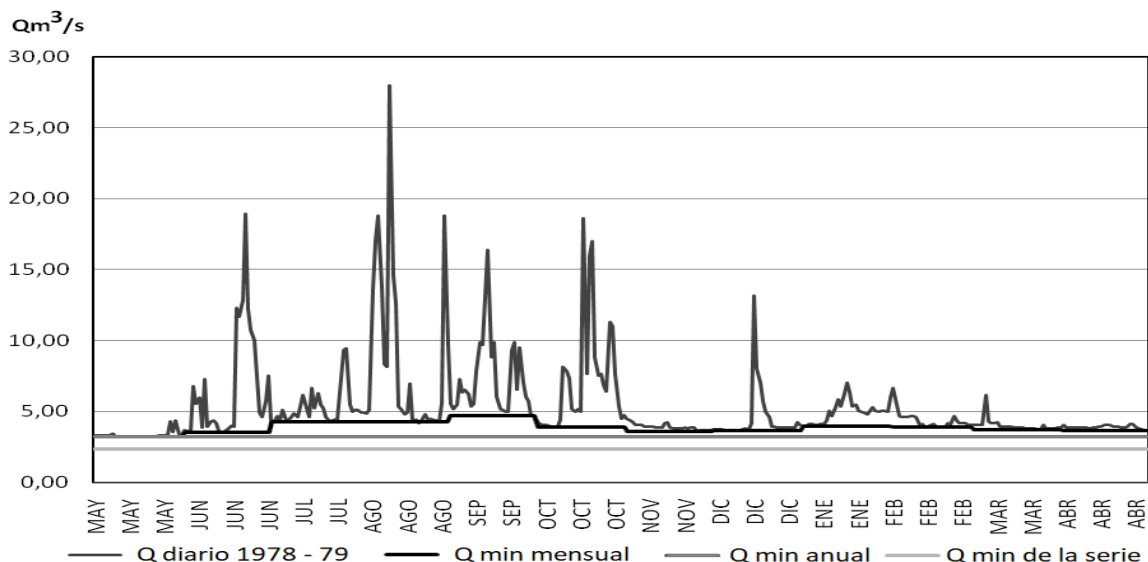


Figura 3. Comportamiento de los gastos promedios diarios (Q diario 1978-79) y de los mínimos de cada mes (Q min mensual) y el mínimo anual observado (Q min anual) para el año hidrológico húmedo 1978 – 1979, respecto al gasto mínimo absoluto (Q min de la serie) registrado desde 1963 a 1990, en la estación San Agustín III

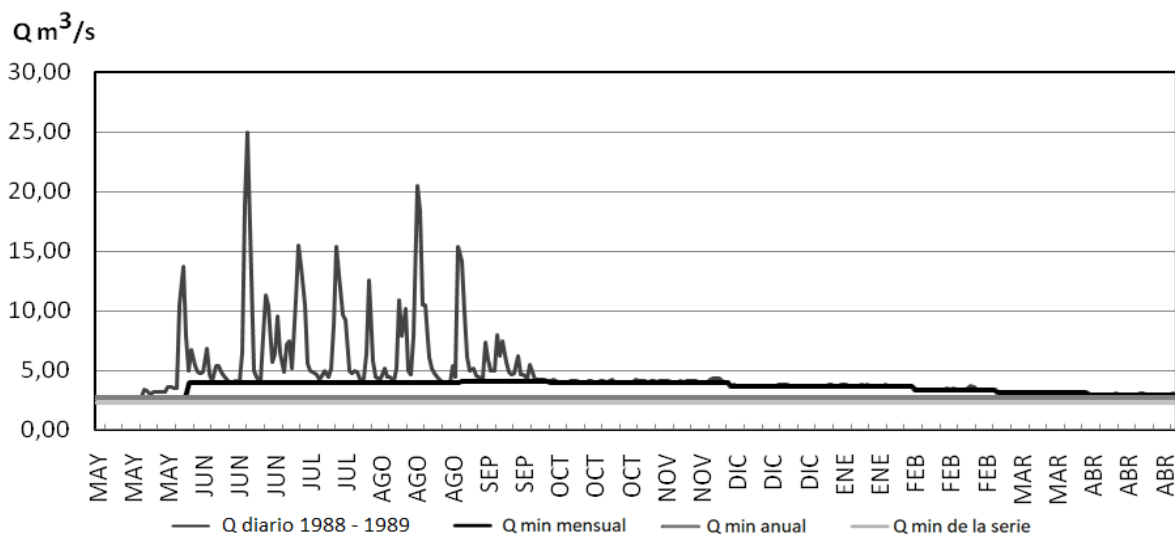


Figura 4. Comportamiento de los gastos promedios diarios (Q diario 1988-89) y de los mínimos de cada mes (Q min mensual) y el mínimo anual observado (Q min anual) para el año hidrológico medio 1988 – 1989, respecto al gasto mínimo absoluto (Q min de la serie) registrado desde 1963 a 1990, en la estación San Agustín III

Para el año seco 1980 – 1981 (figura 5), el aporte del escurrimiento base es mayor que en los años de mayor acuosidad. El gasto promedio mínimo mensual del año seco 1980-81 es de 3,84 m³/s y el promedio anual 4,15 m³/s, equivalente a un volumen de 130.9 hm³, que representa el 92,5%.

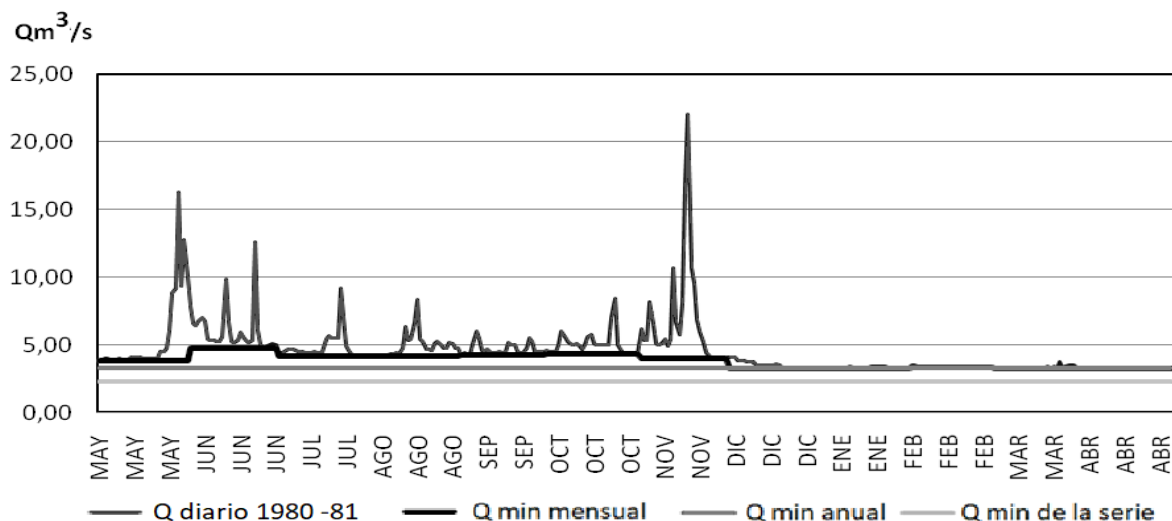


Figura 5. Comportamiento de los gastos promedios diarios (Q diario 1980-81) y de los mínimos de cada mes (Q min mensual) y el mínimo anual observado (Q min anual) para el año hidrológico seco 1980 – 1981, respecto al gasto mínimo absoluto (Q min de la serie) registrado desde 1963 a 1990, en la estación San Agustín III

Como se aprecia en los datos que se muestran en la tabla 1, el aporte subterráneo, o sea el escurrimiento base es similar y representa la parte determinante dentro del valor anual del escurrimiento, de 76% a 92% para años de diferentes probabilidades.

Tabla 1. Valores del escurrimiento para las distintas probabilidades de las precipitaciones anuales. Río San Agustín – Estación San Agustín III

Probabilidad de precipitación anual (%)	C_V	Escurrimiento anual W_a			Escurrimiento base W_b				% de W_b/W_a observado
		M (L/s m ²)	Q (m ³ /s)	W (hm ³)	Año hidrológico	M (L/s km ²)	Q (m ³ /s)	W (hm ³)	
39 - 43 (medio)	0,16	17,7	4,73	149,2	1988-89	13,5	3,60	113,5	76
25 (húmedo)		19,5	5,21	164,3	1978-79	14,4	3,85	121,4	73,9
75 (seco)		15,5	4,15	130,9	1980-81	14,4	3,84	121,1	92,5
C_V : Coeficiente de variación M : Módulo Q : Gasto W : Escurrimiento anual correspondiente al año hidrológico									

Si se sustituyen estos valores en la ecuación 1 del cálculo del balance, conociendo que las precipitaciones fueron 1565 para el año medio, 1666 para el húmedo y 1245 en el seco y manteniendo la evapotranspiración como constante en este ejercicio por no contarse con los valores correspondientes de cada probabilidad, se obtiene que para un año húmedo existe equilibrio, mientras para el año medio el déficit es de 12 hm³ y para el seco es de 79 hm³, demostrándose, la existencia de un aporte adicional a la escorrentía, que varía en dependencia de las precipitaciones y que está relacionado con la componente subterránea que conforma el escurrimiento base de la subcuenca.

Componente subterránea por los valores obtenidos en los aforos de corriente

En el análisis del comportamiento del escurrimiento de la subcuenca San Agustín – Cañas (Del Rosario *et al.* 2013), a partir de los aforos realizados al final del período seco, en el mes de abril y primeros días de mayo del 2011, que se muestran en la tabla 2 y figura 6, se comprobó que la suma de los gastos del río San Agustín (Paso del Medio) y Cañas (puente de los tubos sin el bombeo de los manantiales Bello), se corresponde con el gasto aforado en el cierre del puente La Julia, ubicado aguas abajo y muy próximo a la derivadora San Agustín I:

$$QPM+QCAÑAS-LOS TUBOS=QJulia ; 420+1479=1899 \text{ L/s} ; 1899 \approx 1853 \text{ L/s}$$

También se demostró que existe correspondencia entre los gastos aforados en el puente militar de los tubos del río Cañas (1479 L/s) y en la antigua estación Caña, después de 90 minutos de parada del sistema de bombeo de los manantiales Bello (1471 L/s).

Tabla 2. Resultados de los aforos de los ríos San Agustín, Cañas

No.	Lugar	Caudal (L/s)	Fecha	Observaciones
1	Sección aguas arriba puente de tubos sobre el río Cañas	1479	27/04/2011	
2	Paso del Medio sobre el río San Agustín.	420	05/05/2011	
3	Puente La Julia sobre el río San Agustín.	1853	05/05/2011	
4	Sección Manantiales Bello (s/vertical 6)	1178	28/04/2011	Pozos bombeando
5	Sección Manantiales Bello (con/vertical 6)	1257	28/04/2011	Pozos bombeando
6	Sección Manantiales Bello (30 min de parado sistema)	1413	28/04/2011	Pozos parados
7	Sección Manantiales Bello (90 min de parado sistema)	1471	28/04/2011	Pozos parados



Figura 6. Esquema lineal del sistema fluvial de la cuenca y puntos donde se realizaron las mediciones de corriente

Conociendo que el año hidrológico 2010-2011 tuvo una lluvia de 1413 mm, similar al promedio de la cuenca y por tanto al comportamiento de un año medio; asumiendo un escurrimiento base de 119 hm^3 , basados en que es casi constante para años de diferentes acuosidades y que representa un 76% del escurrimiento anual de un año medio, podemos estimar que el volumen de escorrentía para el año es de unos 156 hm^3 , que el volumen generado por las precipitaciones está en el orden de los 377 hm^3 y manteniendo la evapotranspiración como constante, al sustituir en la fórmula 1 se obtiene, que existe un aporte adicional para este año de 59 hm^3 aproximadamente, el cual es similar a la componente subterránea medida en el aforos de corriente realizados en el puente la Julia, que muestra que en el periodo poco lluvioso corresponde a 58 hm^3 .

Los análisis anteriores demuestran que el aporte adicional a la escorrentía de la subcuenca está relacionado con el aporte significativo de la componente subterránea existente en el territorio y que varía en función de las precipitaciones entre año medio y seco de 10 a 80 hm^3 .

Y dado el déficit existente en el balance, la subcuenca San Agustín-Cañas debe tener un área superior a la determinada por el parteaguas.

Área de aporte adicional a la cuenca de estudio

Para identificar el área donde se genere el aporte adicional a la escorrentía de la cuenca, se analizan los resultados de las investigaciones de la interrelación hidráulica entre las cuencas Aguacate y San Juan.

El recurso hídrico subterráneo es el más utilizado en la cuenca San Juan, dedicado principalmente al abasto de la población a partir de pozos individuales y a sistemas de acueducto que abastecen a la población e industrias de la ciudad de Matanzas, cabecera de la Provincia de igual nombre. Los Manantiales Bello son la principal fuente de abasto con una capacidad instalada de $0.720 \text{ m}^3/\text{s}$. Otras captaciones también importantes son la de los manantiales San Juan, El Conde y La Gloria con gastos de explotación que exceden los $19 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este recurso también se utiliza en la siembra de cultivos varios, que se apoya con riego en las áreas cercanas al poblado de Ceiba Mocha. Predominan los pastos, arboledas y maniguas extensas. Existe el desarrollo del ganado vacuno y ovino, principalmente.

Por tal razón, desde inicios de la década de los años 60 el sistema hidrogeológico Jaruco – Aguacate - MI (también conocida como San Juan-San Agustín-Cañas y se abrevia como San Juan), ha recibido una atención especial por parte de las instituciones nacionales y regionales encargadas del manejo de los recursos hídricos. La mayoría de los estudios han correspondido a la San Juan; sobre todo, desde que Guneva (1967, 1967a), evalúa, con categoría A, unos recursos de explotación de agua subterránea de $1,295 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a un volumen de $40,6 \text{ hm}^3/\text{año}$ y se autoriza desde aquel entonces, la extracción permanente de un caudal de $0,850 \text{ m}^3/\text{s}$, desde el campo de pozos de los Manantiales Bello, para el abasto de agua de la ciudad. Hasta la actualidad, esta investigación hidrogeológica, se considera la rectora de este importante acueducto. En ese año se concluía el esquema de aprovechamiento de las aguas subterráneas en la llamada cuenca San Juan-San Agustín-Cañas (Maslov y Odoev 1967), como parte de las investigaciones posteriores al levantamiento geólogo - hidrogeológico a escala 1: 100 000 de la provincia (Maslov 1967).

El principal problema hidrogeológico del sistema Aguacate–San Juan se presenta a principios de los años 70, cuando las aguas de los manantiales Bello, se contaminan por los residuales azucareros vertidos en una caverna unos 17 km al oeste (figura 7).

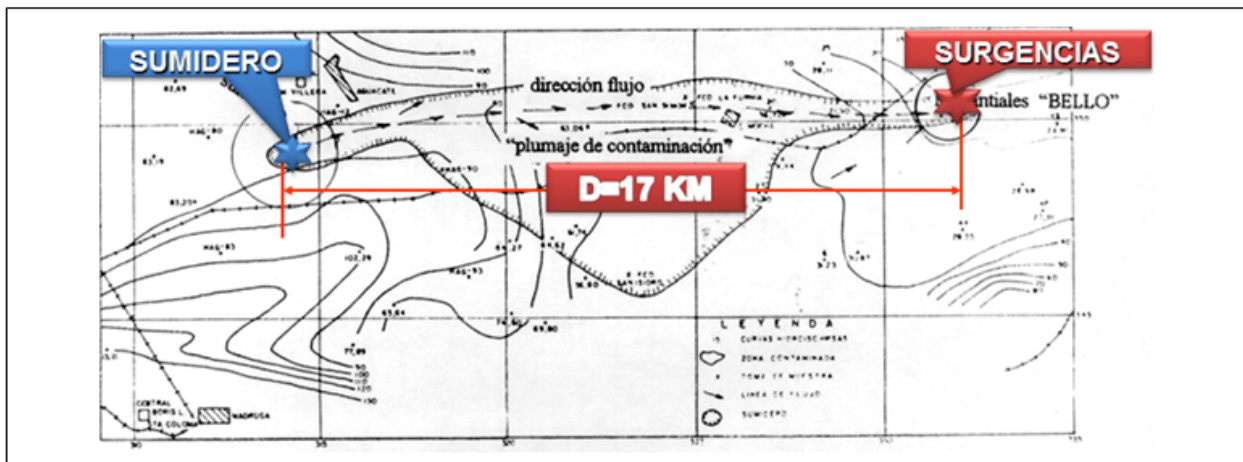


Figura 7. Pluma de contaminación de los residuales del Central Azucarero Boris Luis Santa Coloma infiltrados en el sumidero al sur de Aguacate, Provincia Mayabeque y la surgencia de los Manantiales Bello en la provincia Matanzas. Década del 1970. Fuente: González (2010).

En 1987, se realiza otra investigación hidrogeológica en los Manantiales Bello para la perforación y recomendación de nuevos pozos de abasto (Chong Li *et al.* 1987). En 1990 se presentan los resultados del análisis cualitativo de las concentraciones de tritio (Molerio *et al.* 1990), este estudio determinó una tasa de flujo volumétrico de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para el sistema Aguacate–San Juan, lo que es muy semejante al caudal de descarga de los manantiales Bello. En el año 1996 se concluye la evaluación de los recursos subterráneos de la provincia (Chong Li y Campos 1996) y queda dividida la cuenca MI en varios tramos hidrogeológicos, para los cuales se determinaron los recursos explotables y los parámetros hidrogeológicos. Durante el año 2010 y 2011 por el crecimiento poblacional e industrial y la puesta en marcha del Trasvase Matanzas-Mayabeque se realizaron varias investigaciones que contribuyeron a la evaluación del estado actual de los recursos hídricos de la cuenca hidrogeológica MI (González 2010; Cuéllar *et al.* 2010, 2010a, 2011). En años posteriores se realiza un estudio de los paleovalles y paleocauces en el territorio (Guerra *et al.* 2013).

En estos estudios se define que desde el punto de vista hidrogeológico:

1. La cuenca San Juan – San Agustín – Cañas limita al oeste con la cuenca Jaruco HMJ-2 por un parte aguas hidráulico de un ancho de 2 a 4 km, el cual varía en función de la explotación y alimentación en ambas cuencas (figura 1 y 8). Que en toda la zona se observan diferentes tipos de relieve cársico: carso de llanura, carso cónico, carso de lomas y carso subterráneo y las potentes salidas de manantiales como “Bello” en el río Cañas y “La Gloria” en el San Juan son evidencia del desarrollo cársico en la cuenca.
2. La dirección general del flujo es de oeste a este desde Aguacate a Ceiba Mocha con cotas de 80 m.s.n.m. y de ahí toma rumbo noreste, siguiendo la dirección de los cursos de los ríos San Agustín, Cañas y San Juan, descargando en estos y finalmente en la Bahía de Matanzas, con cotas de 25-20 m.s.n.m. a 1-2 m.s.n.m., respectivamente.

3. La zona de alimentación principal del sistema se encuentra al oeste en el polje ubicado al suroeste del poblado de Aguacate, aunque la alimentación ocurre a todo lo largo del territorio a través de todas las formas cársicas existentes.
4. Los Manantiales Bello y el sumidero cársico ubicado a 17 km al oeste, en la cuenca Aguacate, están conectados directamente mediante sistemas cársicos preferenciales.
5. La contaminación ocurrida en el territorio, evidencia, que el acuífero tiene características comunes a la red hidrográfica superficial con un drenaje organizado, heterogéneo, debido a procesos de carsificación, que definen su función transmisiva, la cual gobierna el flujo subterráneo.

Las investigaciones realizadas permiten concluir que el aporte subterráneo es generado por la infiltración de las precipitaciones que ocurre en el área del polje y la zona cársica desarrollada en la cuenca Aguacate al oeste de la subcuenca San Agustín – Cañas. Este volumen infiltrado se descarga, en su mayoría, en los Manantiales Bello y a su vez constituye parte de la componente subterránea observada en los hidrógrafos y calculada en aforos de corriente.

El tamaño de la región donde se genera este aporte subterráneo se determinó por la delimitación de la zona de infiltración en la cuenca Aguacate, a partir de las curvas de hidroisohipsas (figura 8) y tiene un área del orden de los 77 km², aunque si consideramos el área total de la cuenca Aguacate serían 145 km².

Aunque estas áreas resulten superiores a los 55 km² obtenidos a partir del déficit de volumen en el balance simple, se considera que sí se corresponde con el área adicional que se necesita para un balance en equilibrio. Los análisis anteriores demuestran que el aporte adicional a la escorrentía de la subcuenca varía en función de las precipitaciones entre año medio y seco de 10 a 80 hm³. Si se estiman las áreas correspondientes en función de estos valores, obtenemos que varían de 18 a 144 km². Esto significa que el área que aporta la infiltración eficaz de la componente subterránea varía en función de la probabilidad de la acuosidad. Para un año seco, la escorrentía superficial es casi nula, porque un gran porcentaje de la precipitación que cae se infiltra en todo el territorio, lo que equivale a un área de mayor aporte; mientras en un año medio, la precipitación se infiltra en los suelos de mayor capacidad de infiltración, por tanto, disminuye el área efectiva para el aporte de la componente subterránea. Y partiendo de que el balance se realiza en término hiperanual, los valores de 30,5 hm³ y 55 km² se corresponden con el valor medio de los rangos estimados, que están sobre los 35 hm³ y 63 km².

Este análisis permite concluir que el balance hídrico en la cuenca San Juan y estudios hidrológicos e hidrogeológicos, deben ser evaluados de manera integral, considerando los límites del sistema Aguacate–San Juan y no restringiéndolo a los límites administrativos entre las provincias.

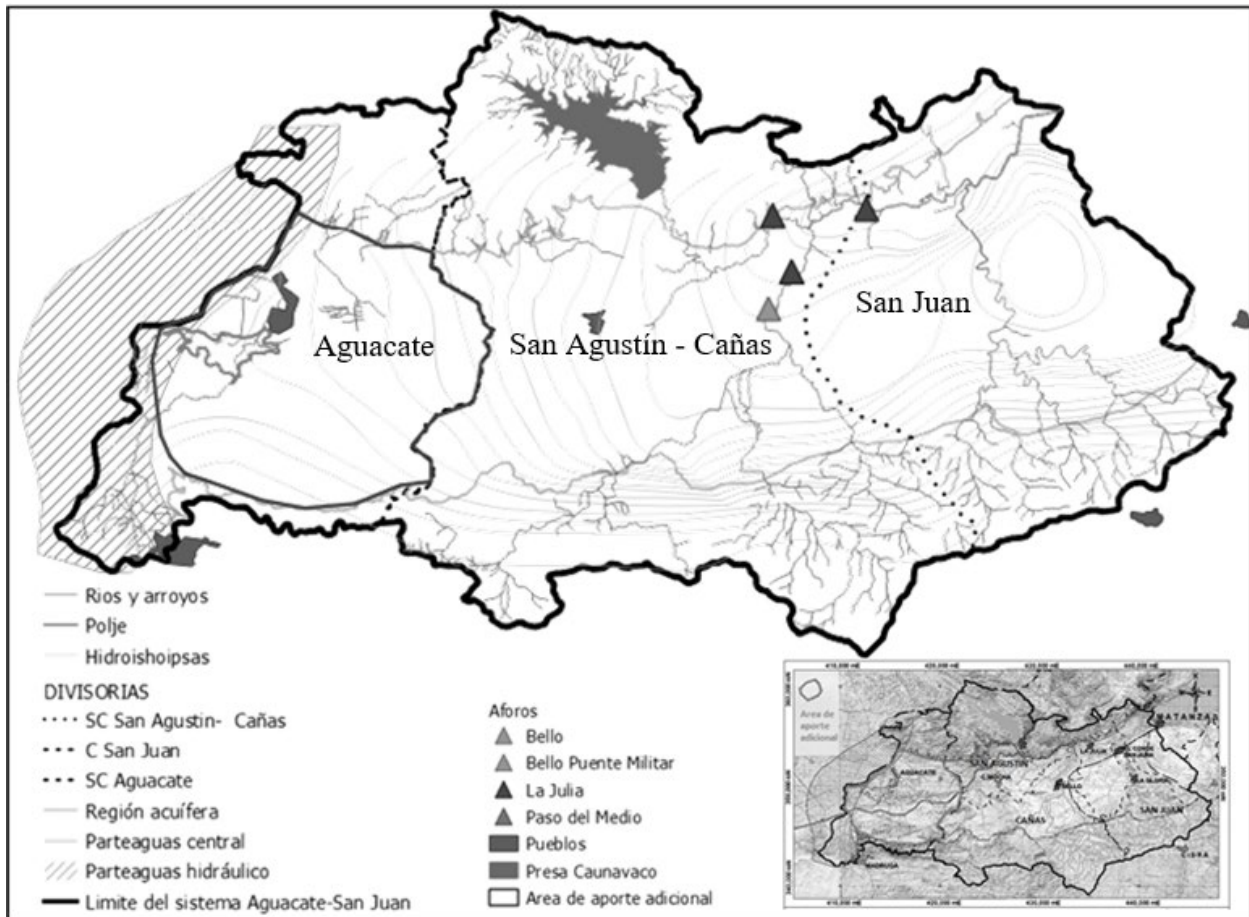


Figura 8. Representación del área adicional localizada en la cuenca Aguacate, que tributa el aporte de la componente subterránea hacia la subcuenca San Agustín – Cañas.

CONCLUSIONES

- Se determinó que el aporte adicional del orden de $30,5 \text{ hm}^3$ a la escorrentía de la cuenca, está relacionado con el aporte significativo de la componente subterránea existente en el territorio y que varía en función de las precipitaciones, entre año seco a medio, de 10 a 80 hm^3 .
- El análisis de la interrelación hidráulica entre las cuencas Aguacate y San Juan, permitieron demostrar que el aporte subterráneo al balance hídrico de la cuenca, se genera por la infiltración de las precipitaciones que ocurre en la cuenca Aguacate, ubicada al oeste de la cuenca San Juan.
- Se estima que las áreas correspondientes al rango de la componente subterránea, varía de 18 a 144 km^2 , concluyendo que el área que aporta la infiltración eficaz de la componente subterránea varía también en función de la probabilidad de la acuosidad que se analice.
- El balance realizado en término hiperanual, con valores de $30,5 \text{ hm}^3$ y 55 km^2 se corresponden con el valor medio de los rangos estimados de la componente subterránea y del área de aporte, que están sobre los 35 hm^3 y 63 km^2 .
- Los resultados obtenidos permitieron recomendar a los gestores de los recursos hídricos que el balance hídrico y estudios hidrológicos e hidrogeológicos, en la cuenca San Juan,

debe ser evaluado de manera integral, considerando los límites del sistema Aguacate–San Juan y no restringiéndolo a los límites administrativos entre las provincias.

REFERENCIAS

- Chong Li A. y Campos M. J.** (1996). “Esquema regional precisado de aprovechamiento integral de los recursos hídricos y agrarios de las provincias Matanzas, Habana y Ciego De Ávila. Tomo Hidrogeología: Recursos de las aguas subterráneas. Segunda versión.” Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón. Matanzas, Cuba.
- Chong Li A. et al.** (1987). “Breve informe de las investigaciones hidrogeológicas para la perforación y recomendación de los pozos de abasto al acueducto de la ciudad de Matanzas, en la zona del Complejo de Manantiales Bello”. G-2 Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón. Matanzas, Cuba.
- Cuéllar A.** (2010). “Determinación del caudal de drenaje del manantial el Pon Pon. Matanzas”. Unidad Empresarial de Base Investigaciones, Proyectos e Ingeniería de Matanzas. Informe Técnico del Servicio: 579-08-02C-10, Matanzas, Cuba.
- Cuéllar A.** (2010a). “Estudio hidrogeológico acueducto El Conde. Matanzas”. Unidad Empresarial de Base Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, Matanzas. Informe Técnico del Servicio: 599-08-02C-10. 2010a, Matanzas, Cuba.
- Cuéllar A.** (2011). “Evaluación del estado actual de la cuenca M-I, Empresa de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería”. Unidad Empresarial de Base Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, Matanzas. Informe Técnico del Servicio: 077-08-02C-11, Matanzas, Cuba.
- Del Rosario K.; Petrova V.; Cuéllar A. y Acosta D.** (2011). “Estudio hidrológico de la formación y comportamiento del escurrimiento superficial de la cuenca San Agustín – Cañas – San Juan”. Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, INRH, Colón. Matanzas. Informe Técnico 077-08-02C-11, Matanzas, Cuba.
- Del Rosario K.** (2013). “Herramientas estadísticas para el manejo de recursos hidráulicos subterráneos”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, ISSN 1815-591X, RNPS 2066, CIH, Cujae, La Habana, Cuba, vol. XXXIV, núm. 1, p. 73-88.
- Del Rosario K.; Petrova V.; Llanusa H. y Hernández A.** (2015) “Variabilidad de la precipitación anual en la cuenca San Juan”. Inédito, Cuba.
- González, A.** (2010). "Contaminación De Los Manantiales Bello." En Curso IV de Hidrogeología. La Habana: CODIA-PNUMA.
- Guerra M.; Luis R.; Del Rosario K.; Petrova V. y Cuéllar, A.** (2013). “Evaluación del estado actual de la cuenca M-I. Segunda Etapa”. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Matanzas. Archivo, Matanzas, Cuba.
- Guneva S.** (1967). “Estudio hidrogeológico de la cuenca Jaruco-Aguacate, Habana”, Informe técnico, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana.

Guneva S. (1967a). "Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Cañas-Manantiales Bello. Provincia Matanzas.", Empresa Investigaciones, Proyectos e Ingeniería, Matanzas. Informe técnico G-2, Colón, Matanzas, Cuba

Maslov V. (1967). "Informe del levantamiento geólogo-hidrogeológico a escala 1:100 000", Instituto de Hidroeconomía, Matanzas, Cuba.

Maslov V. y Odoev V. (1967). "Informe de las investigaciones hidrogeológicas realizadas en las cuencas de los ríos San Juan, San Agustín y Canas". Instituto de Hidroeconomía, Matanzas, Cuba

Molerio L.; D. Arellano; A. Surí; A. Santos y Del Rosario K. (1990). Dinámica de las aguas subterráneas en la cuenca Jaruco-Aguacate, ARCAL XIII-RLA/8/14. Primera Reunión de Responsables de los Estudios de los Recursos y la Contaminación de las Aguas Subterráneas, Instituto Pesquisas Hidráulicas, Universidad Federal Río Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1990, p. 13-151.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Katia del Rosario Rodriguez <https://orcid.org/0000-0001-6502-8205>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó el diseño de la investigación, los trabajos de campo, análisis de los resultados, en la redacción del informe final.

Viera Petrova <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó el diseño de la investigación, los trabajos de campo, cálculo de los escurrimientos para distintas probabilidades, análisis de los resultados, en la redacción del informe final.

Haydee Llanusa Ruiz <https://orcid.org/0000-0003-4326-5466>

Análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final.

Armando Hernández Valdés <https://orcid.org/0000-0002-2479-6854>

Análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final.

Realizó la interpretación de los datos, desarrollo de los ensayos y análisis de los resultados.