

Evaluación cuantitativa del balance hídrico subterráneo y diagnóstico de explotación de la cuenca Hanábana (CF1), Cuba

Roxana Aymeé Luis Winograd

E-MAIL: roxluis87@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). La Habana, Cuba.

Daniela González Regalado

E-MAIL:

Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). La Habana, Cuba.

RESUMEN

Las aguas subterráneas son un recurso estratégico cuya disponibilidad se ve afectada por la disminución de las precipitaciones y el aumento de las demandas. Esta investigación reevaluó el potencial hídrico de la cuenca Hanábana (CF1), en Cienfuegos, Cuba, aplicando el método de Bindeman (oscilaciones de niveles) y el método de balance hídrico de un acuífero. Se procesaron datos de 12 pluviómetros, 55 pozos de observación, las demandas de los principales usuarios (MINAG, AZCUBA, INRH y MININT) y parámetros hidrogeológicos, con los software MapInfo Pro 16.0 y Surfer 27.1.229. El balance hídrico de 2023 arrojó un potencial de 108,767 hm³ y el método de Bindeman un recurso explotable de 94,102 hm³, con una diferencia del 13,5 %. La demanda total anual fue de 111,354 hm³, superando ambas estimaciones, y el método de Bindeman indicó sobreexplotación del acuífero ($\beta = 2,077$). Se concluye que, independientemente del método, existe un déficit hídrico en la cuenca, lo que constituye una alerta para la planificación de las demandas futuras ante la tendencia decreciente de las precipitaciones.

PALABRAS CLAVE: *balance hídrico, cuenca hidrogeológica, potencial hídrico, método de Bindeman, aguas subterráneas, Cienfuegos*

Quantitative assessment of the groundwater balance and exploitation diagnosis of the Hanábana basin (CF1), Cuba

ABSTRACT

Groundwater is a strategic resource whose availability is affected by decreasing rainfall and rising demands. This research reassessed the water potential of the Hanábana basin (CF1), in Cienfuegos, Cuba, applying the Bindeman method (water level fluctuation) and the aquifer water balance method. Precipitation data from 12 rain gauges, 55 observation wells, the demands of the main users (MINAG, AZCUBA, INRH, and MININT), and hydrogeological parameters were processed using MapInfo Pro 16.0 and Surfer 27.1.229 software. The 2023 water balance yielded a potential of 108.767 hm³ and the Bindeman method an exploitable resource of 94.102 hm³, with a 13.5% difference. Total annual demand was 111.354 hm³, exceeding both estimates, and the Bindeman method indicated aquifer overexploitation ($\beta = 2.077$). It is concluded that, regardless of the method, a water deficit exists in the basin, constituting a warning for the planning of future demands given the decreasing rainfall trend.

KEYWORDS: *water balance, hydrogeological basin, water potential, Bindeman method, groundwater, Cienfuegos*

01 INTRODUCCIÓN



2025-03-10– RECIBIDO:

APROBADO: 2025-06-10

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](#).

Las aguas subterráneas constituyen la reserva de agua dulce líquida más importante del planeta, representando aproximadamente el 97 % del volumen total disponible, excluyendo glaciares y casquetes polares (Cristo, 2023; Marín, 2014). Su papel es fundamental para el mantenimiento de los caudales base de los ríos, la sustentación de humedales y la mitigación de los efectos de las sequías (Caraballo, 2012). Cuba, un archipiélago con un 67 % de su territorio compuesto por rocas carbonatadas kársticas de alta permeabilidad, depende en gran medida de sus aguas subterráneas para el abastecimiento a la población, la agricultura y la industria (Báez, 2020; Valdés, 2011). La provincia de Cienfuegos, a pesar de contar con condiciones favorables en cuanto a disponibilidad de agua, enfrenta desafíos en la gestión de sus recursos hídricos (Flores, 2021). La cuenca subterránea Hanábana (CF1), ubicada al oeste de la provincia, es una de las más importantes, con un área de 980,8 km² y un recurso explotable históricamente estimado en 140 hm³. En los últimos años se ha observado un régimen de precipitaciones descendentes en la región, con períodos de sequía prolongados (Sánchez, 2009), lo que unido al aumento paulatino de las demandas para la agricultura, la industria azucarera y el abasto humano, genera incertidumbre sobre el estado actual de las reservas. Investigaciones previas (Suárez, 2020) ya señalaban un comportamiento crítico de la cuenca al finalizar períodos secos. El desconocimiento del estado actual de las reservas hídricas puede conducir a una gestión inadecuada, fomentando la sobreexplotación y poniendo en riesgo la sostenibilidad del recurso a largo plazo. El objetivo de la presente investigación es reevaluar el potencial hídrico de la cuenca CF1 aplicando el método de Bindeman y el método de balance hídrico de un acuífero, para proporcionar información actualizada que permita una correcta gestión del recurso hídrico en el territorio.

02 REFERENTES TEÓRICOS

El estudio de los recursos hídricos subterráneos se sustenta en principios hidrológicos e hidrogeológicos fundamentales. El ciclo hidrológico, impulsado por la energía solar y la gravedad, comprende cinco etapas esenciales: evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía (Cristo, 2023). La infiltración, proceso mediante el cual el agua penetra a través de las capas permeables del suelo, está gobernada por las fuerzas de gravedad y capilaridad, y depende de factores como la textura del suelo, la cobertura vegetal y la intensidad de la precipitación (Marín, 2014). El agua que alcanza la zona saturada pasa a formar parte de las aguas subterráneas, almacenadas en formaciones geológicas permeables denominadas acuíferos.

Las aguas subterráneas desempeñan funciones ecológicas y socioeconómicas de primer orden: mantienen los caudales base de los ríos durante el estiaje, sustentan humedales y mitigan los efectos de las sequías (Caraballo, 2012). Sin embargo, su condición de recurso “invisible” conlleva riesgos, ya que la sobreexplotación —extracción superior a la recarga natural— puede tardar en hacerse evidente, provocando agotamiento de reservas, incremento de costos de bombeo, deterioro de la calidad por intrusión salina y afectación de ecosistemas dependientes (Valdés, 2011).

El balance hídrico, fundamentado en el principio de conservación de la masa, constituye la herramienta conceptual esencial para la evaluación cuantitativa de los recursos hídricos. Su expresión general establece que la variación del volumen almacenado en un sistema (ΔV) es igual a la diferencia entre las entradas y las salidas (Báez, 2020). Para un acuífero, las entradas típicas incluyen la precipitación infiltrada, la recarga desde cursos superficiales y los aportes de acuíferos colindantes, mientras que las salidas comprenden la explotación mediante pozos, la evapotranspiración desde el nivel freático y el escurrimiento subterráneo (Flores, 2021).

El método de Bindeman —también conocido como método de las oscilaciones del nivel freático— ocupa un lugar destacado por su capacidad para estimar la infiltración eficaz y los recursos explotables a partir del análisis de los registros de niveles en pozos de observación (Sánchez, 2009). Desarrollado para condiciones de flujo lineal en acuíferos libres, este método se fundamenta en la ecuación de continuidad expresada en términos de volumen y en el concepto de porosidad efectiva (μ). A partir de los limnigramas se determinan la recarga neta (Δh) y la descarga total (Δz), calculándose la infiltración eficaz como:

$$W = \mu \times \frac{\sum(\Delta h + \Delta z)}{t} \quad (2.1)$$

Multiplicando por el área de la cuenca (F) se obtiene el Recurso Hídrico Subterráneo Explotable (RHSE). Adicionalmente, el coeficiente de capacidad útil ($\beta = h/\Delta H$), donde h es la oscilación hiperanual de los niveles y ΔH la alimentación media aparente, permite diagnosticar el estado de explotación: valores de $\beta > 2$ indican sobreexplotación (Suárez, 2020).

Por su parte, el método de balance hídrico de un acuífero adopta un enfoque de caja negra que cuantifica explícitamente las entradas y salidas del sistema. Para su aplicación se requiere información sobre precipitaciones, coeficientes de infiltración, volúmenes de explotación y parámetros hidrogeológicos como la transmisividad y el gradiente hidráulico, que permiten estimar el escurrimiento subterráneo mediante la Ley de Darcy como se muestra en la ecuación (2.2) (Fernández, 2012).

$$Q = T \times I \times B \quad (2.2)$$

Donde: Q es el caudal subterráneo ($\text{m}^3/\text{día}$); T es la transmisividad del acuífero en la zona costera ($\text{m}^2/\text{día}$); I es el gradiente hidráulico (adimensional), calculado como $I = (H_1 - H_2)/L$; y B es el ancho de la sección de salida (m).

La reevaluación periódica de los recursos hídricos subterráneos constituye una práctica esencial para la gestión adaptativa de los acuíferos. Los sistemas hidrogeológicos no son estáticos: las condiciones climáticas varían, las demandas evolucionan y el conocimiento sobre el funcionamiento del acuífero se incrementa con nuevas investigaciones (Peñalver, 1999). En Cuba, con un 67 % del territorio constituido por rocas carbonatadas kársticas y más del 70 % del agua destinada al abasto público procedente de fuentes subterráneas, la actualización periódica de las evaluaciones del potencial hídrico resulta indispensable para una gestión sostenible del recurso (Planos et al., 2013).

03 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica del área de estudio

La cuenca subterránea Hanábana (CF1) se localiza en la provincia de Cienfuegos, Cuba, entre los 225 420 °N y 325 420 °N de latitud y los 499 638 °E y 599 638 °E de longitud como se muestra en la figura 3.1. Limita al norte con la provincia de Matanzas, al este con las cuencas Cartagena (CF4) y Abreus (CF3), y al sureste con la cuenca Juraguá (CF2). Ocupa un área de 980,8 km² y se encuentra seccionada en cinco tramos hidrogeológicos (Yaguaramas-Aguada, Charcas-Yaguaramas, Aguada-Damuji, Abreus y Juraguá) con una variada constitución geológica donde predominan rocas del Cretácico (Formaciones Cantabria y Arabo), Mioceno (Formación Güines) y depósitos del Cuaternario (Rodríguez, 2018).

El clima es tropical marítimo, con dos estaciones bien definidas: período húmedo (mayo-octubre) y período seco (noviembre-abril). La temperatura media anual es de 24,6 °C y la humedad relativa promedio del 80 % (Departamento de Meteorología de Cienfuegos, 2016). La arteria fluvial más importante es el río Hanábana, de curso perenne, que discurre sobre las calizas cavernosas del Mioceno alimentando las aguas subterráneas y se pierde en la Ciénaga Oriental de Zapata.

3.2. Datos utilizados y fuentes de información

Para la realización de este estudio se recopilieron las siguientes fuentes de información:

- Registros diarios de precipitación del año 2023 correspondientes a 12 estaciones pluviométricas pertenecientes a la red del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) distribuidas en la cuenca (Tabla 3.1).
- Datos de niveles freáticos de 55 pozos de observación, de los cuales 19 cuentan con mediciones mensuales y 36 con mediciones semestrales.
- Información sobre volúmenes de extracción por organismos (demandas) proporcionada por la Empresa de

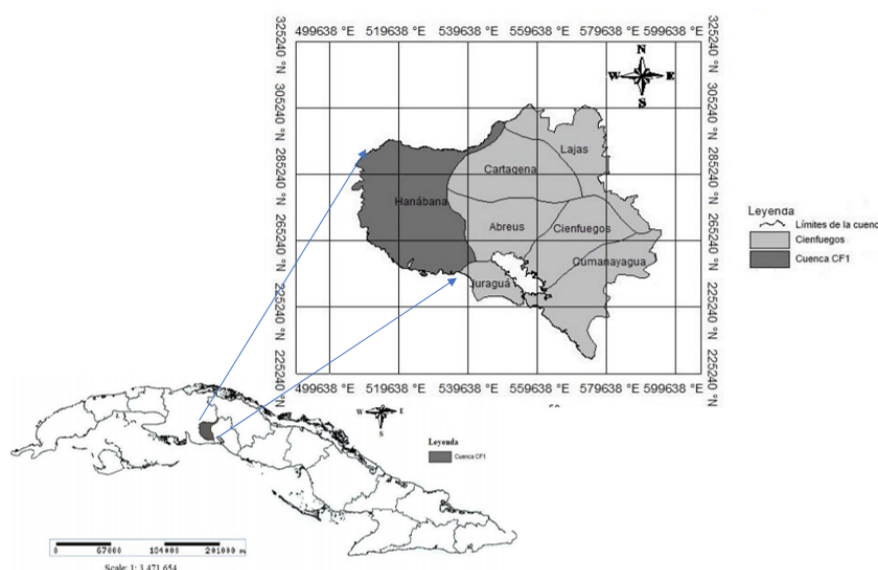


Figure 3.1. Ubicación del área de estudio.

Aprovechamiento Hidráulico (EAH) de Cienfuegos para el año 2023.

- Parámetros hidrogeológicos de las formaciones presentes (coeficiente de almacenamiento $\mu = 0,07$, conductividad hidráulica según valores tabulados por Fernández (Fernández, 2012)).
- Cartografía digital escala 1:50 000 del Instituto de Geografía Tropical.

Table 3.1. Estaciones pluviométricas de la cuenca CF1.

No. de control	Nombre	Altitud (m)	Municipio
4	Pozo Cercado	13,6	Aguada de Pasajeros
8	María Victoria	22,3	Aguada de Pasajeros
19	Rincón Campiña	36,1	Aguada de Pasajeros
20	Manguito	9,1	Abreus
32	El Corojo	46,6	Rodas
35	Charcas	11,9	Abreus
414	Chucho Milagros	42,2	Aguada de Pasajeros
517	Esles de Venero	50,0	Aguada de Pasajeros
555	La Cristina	20,0	Aguada de Pasajeros
562	Embalse Galindo	17,1	Abreus
925	Jocuma	3,5	Aguada de Pasajeros
959	Embalse Voladora	58,4	Rodas

3.3. Procesamiento de la información con Sistemas de Información Geográfica

Los datos espaciales fueron procesados mediante el software MapInfo Professional versión 16.0. Se georreferenciaron todos los puntos de muestreo (pluviómetros y pozos) asignándoles coordenadas planas en el sistema de proyección Cuba Norte, generando capas temáticas que permitieron visualizar la distribución espacial de los puntos de control y delimitar el área de la cuenca.

Para la interpolación espacial de las variables hidrogeológicas (niveles freáticos, cotas topográficas) se utilizó el software Surfer versión 27.1.229. Se aplicó el método de Kriging, seleccionado por su capacidad para generar superficies continuas a partir de datos puntuales minimizando la varianza del error. Se definió un tamaño de celda de 100 m $\times$ 100 m y con los archivos grid generados se elaboraron mapas de hidroisohipsas para los períodos húmedo y seco, así como modelos digitales de elevación del terreno.

3.4. Método de balance hídrico de un acuífero

El balance hídrico del acuífero se determinó aplicando la ecuación de continuidad adaptada a las condiciones del área de estudio:

$$\Delta V = (P \times \alpha \times F) - (E_x + E_{sm}) \quad (3.1)$$

Donde: ΔV es la variación del volumen almacenado (hm^3); P es la precipitación media mensual (mm); α es el coeficiente de infiltración (adimensional, tomado como 0,25 según estudios previos (Suárez, 2020)); F es el área de la cuenca ($980,8 \text{ km}^2$); E_x es el volumen extraído por explotación (hm^3); y E_{sm} es el escurrimiento subterráneo al mar (hm^3).

La precipitación media mensual se calculó mediante el método de la media aritmética, promediando los valores registrados en los 12 pluviómetros. Las demandas (E_x) corresponden a los volúmenes reportados por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico para cada mes, desglosados por organismo: Ministerio de la Agricultura (MINAG), Ministerio del Azúcar (AZCUBA), INRH (abasto a la población) y Ministerio del Interior (MININT). El escurrimiento subterráneo al mar (E_{sm}) se estimó mediante la ecuación (2.2); la transmisividad se obtuvo de la ecuación:

$$T = K \times H \quad (3.2)$$

Donde K es la conductividad hidráulica (m/día) según valores tabulados para cada tipo de roca (Fernández, 2012) y H es el espesor saturado del acuífero (m). El gradiente hidráulico se determinó a partir de los mapas de hidroisohipsas elaborados con Surfer.

3.5. Método de Bindeman (oscilaciones de niveles freáticos)

El método de Bindeman se aplicó siguiendo la metodología propuesta por Bindeman (Bindeman, 1963) y adaptada por Peñalver (Peñalver, 1999) para condiciones de acuíferos libres. Se seleccionaron 14 pozos de observación con series completas de niveles para el período de estudio, asegurando su representatividad espacial. A partir de los limnigramas de cada pozo se determinaron visualmente los siguientes parámetros: Δh , ascenso neto del nivel durante el período de recarga (m); Δz , descenso del nivel durante todo el año por efectos combinados de explotación y drenaje natural (m); ΔZ_s , descenso durante el período seco (noviembre-abril); y ΔZ_h , descenso durante el período húmedo (mayo-octubre).

La alimentación total aparente (ΔH) se calculó como:

$$\Delta H = \sum \Delta h + \sum \Delta Z_h \quad (3.3)$$

La descarga total (ΔZ) como:

$$\Delta Z = \sum \Delta Z_s + \sum \Delta Z_h \quad (3.4)$$

La infiltración eficaz (W) para cada pozo se obtuvo mediante:

$$W = \mu \times \frac{\sum \Delta h + \sum \Delta Z}{t} \quad (3.5)$$

Donde: μ es el coeficiente de almacenamiento (adimensional), tomado como 0,07 según estudios previos en la región (Suárez, 2020); y t es el tiempo total de observación (365 días).

La infiltración eficaz media de la cuenca (W_{media}) se calculó promediando los valores obtenidos para los 14 pozos mediante:

$$W_{media} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \quad (3.6)$$

El Recurso Hídrico Subterráneo Explotable (RHSE) se determinó como:

$$RHSE = F \cdot W_{media} \quad (3.7)$$

3.6. Evaluación del estado de explotación

Para evaluar si el acuífero se encuentra en equilibrio dinámico se calculó el coeficiente de capacidad útil (β) propuesto por Bindeman:

$$\beta = \frac{h}{\Delta H} \quad (3.8)$$

Donde: h es la oscilación hiperanual de los niveles (diferencia entre el nivel máximo histórico y el nivel mínimo registrado) (m); y ΔH es la alimentación media aparente (m).

El criterio de interpretación establece que si $\beta < 2$ el acuífero está subexplotado, y si $\beta > 2$ el acuífero está sobreexplotado.

Adicionalmente, como $\beta > 2$, se calculó el nivel mínimo admisible mediante la fórmula de Armesto Pons:

$$N_{adm} = N_{min\ histrico} + 2\Delta H - h \quad (3.9)$$

04 RESULTADOS

4.1. Comportamiento espacial de los niveles freáticos

La topografía de la cuenca CF1 presenta cotas que oscilan entre 0 y 70 m s. n. m., con las máximas elevaciones localizadas al noroeste del área de estudio, mientras que hacia el sureste las cotas descienden paulatinamente hasta alcanzar los límites costeros. El análisis de los mapas de niveles freáticos elaborados para los períodos húmedo y seco mostró variaciones significativas: durante el período húmedo los niveles variaron entre 0 y 55 m s. n. m., mientras que en el período seco el rango se redujo a 0-50 m s. n. m. La dirección general del flujo subterráneo es hacia el suroeste, coincidiendo con la pendiente topográfica y la dirección de drenaje hacia la Ciénaga de Zapata y el mar.

4.2. Balance hídrico por el método del acuífero

La precipitación acumulada en la cuenca durante el año 2023 alcanzó un valor de 1 354,9 mm, inferior a la media histórica de 1 447,9 mm. La distribución mensual de las lluvias mostró los mayores valores en los meses de mayo a septiembre, coincidiendo con el período húmedo, aunque julio presentó valores notablemente bajos dentro de este período.

Las demandas totales de los usuarios para el mismo período ascendieron a 111,354 hm³, distribuidas principalmente entre el Ministerio de la Agricultura (MINAG) con 93,645 hm³ (84,1 %), el Ministerio del Azúcar (AZCUBA) con 10,877 hm³ (9,8 %), el abasto a la población (INRH) con 6,106 hm³ (5,5 %) y el Ministerio del Interior (MININT) con 0,726 hm³ (0,6 %).

El escurrimiento subterráneo hacia el mar se calculó en 1,5 hm³ anuales, valor obtenido a partir de la aplicación de la Ley de Darcy considerando una transmisividad media de 100 m²/día, un gradiente hidráulico promedio de 0,001 y un ancho de sección de salida de 40 km.

El balance hídrico mensual (Tabla 4.1) mostró que en siete meses del año (enero, febrero, marzo, abril, noviembre, diciembre y julio) el volumen infiltrado fue inferior a la demanda extraída, siendo enero y febrero los meses con mayor déficit. El volumen final al cierre del período, considerando un volumen inicial nulo a efectos comparativos, resultó en un déficit de -2,587 hm³.

4.3. Resultados del método de Bindeman

El análisis de los limnigramas de los 14 pozos de control permitió determinar los parámetros de balance interno. La Tabla 4.2 presenta los valores de infiltración eficaz (W) y los parámetros para el cálculo del coeficiente β para los pozos seleccionados. La infiltración eficaz media anual (W_{media}) para el conjunto de los pozos fue de 0,096 m/año.

Table 4.1. Balance hídrico mensual de la cuenca CF1 para el año 2023.

Mes	Precipitación (mm)	V. Infiltrado (hm ³)	Demanda Total (hm ³)	Esc. Mar (hm ³)	Balance Mensual (hm ³)
Enero	2,5	0,490	9,279	0,125	-8,9
Febrero	3,0	0,588	9,279	0,125	-8,8
Marzo	55,7	10,917	9,279	0,125	1,5
Abril	163,2	31,987	9,279	0,125	22,5
Mayo	384,0	75,264	9,279	0,125	65,8
Junio	227,6	44,610	9,279	0,125	35,2
Julio	64,8	12,701	9,279	0,125	3,2
Agosto	264,2	51,783	9,279	0,125	42,3
Septiembre	186,6	36,574	9,279	0,125	27,1
Octubre	93,4	18,306	9,279	0,125	8,9
Noviembre	54,0	10,584	9,279	0,125	1,1
Diciembre	59,5	11,662	9,279	0,125	2,2
Total	1354,9	108,767	111,354	1,5	-2,5

Table 4.2. Valores de infiltración eficaz y coeficiente β en pozos seleccionados.

Pozo	μ	W (m/año)	h (m)	ΔH (m)	$\beta = h/\Delta H$
A-275A	0,07	1,516	13,00	6,26	2,08
P-58	0,07	1,541	14,50	6,98	2,08
P-42	0,07	0,707	9,60	4,62	2,08
A-353	0,07	0,766	10,20	4,90	2,08
A-64	0,07	0,656	8,90	4,28	2,08
P-37	0,07	1,329	12,80	6,15	2,08
P-52	0,07	0,519	7,80	3,75	2,08
L-11	0,07	1,499	13,20	6,35	2,08
L-13	0,07	1,218	11,90	5,72	2,08
A-85	0,07	1,763	14,80	7,12	2,08
A-143	0,07	1,107	11,20	5,38	2,08
A-468	0,07	1,107	11,20	5,38	2,08
P-51	0,07	1,120	11,30	5,43	2,08
P-41	0,07	2,827	18,50	8,89	2,08
Promedio	0,07	0,096	–	–	2,077

Aplicando la ecuación (3.7), el Recurso Hídrico Subterráneo Explotable (RHSE) para la cuenca CF1 se estimó en:

$$\text{RHSE} = 980,8 \text{ km}^2 \times 0,096 \text{ m/año} = 94,102 \text{ hm}^3/\text{año} \quad (4.1)$$

Los parámetros de descarga del período seco (ΔZ_s) y del período húmedo (ΔZ_h) obtenidos de los limnigramas se presentan en la Tabla 4.3. Se observa que la descarga total (ΔZ) varía entre 0,69 m y 2,98 m para los diferentes pozos, mientras que la alimentación total aparente (ΔH) oscila entre 0,77 m y 3,26 m.

Table 4.3. Parámetros de descarga en período seco y húmedo.

No.	Pozo	Δh	ΔZ_h	ΔZ_s	ΔH	ΔZ
1	A-275A	1,20	0,58	0,94	1,78	1,52
2	P-58	0,70	1,11	1,81	1,81	1,11
3	P-42	0,32	0,51	0,83	0,83	0,51
4	A-353	0,33	0,57	0,18	0,90	0,75
5	A-64	0,23	0,54	0,38	0,77	0,92
6	P-37	1,15	0,41	1,15	1,56	2,26
7	P-52	0,18	0,43	0,26	0,61	0,69
8	L-11	0,73	0,70	0,60	1,43	1,30
9	L-13	0,68	0,76	0,64	1,44	1,40
10	A-85	1,59	0,48	1,35	2,07	1,83
11	A-143	0,94	0,50	0,82	1,44	1,32
12	A-468	0,30	0,25	0,30	0,55	0,55
13	P-51	0,23	0,30	1,60	0,53	1,90
14	P-41	1,82	0,65	0,63	2,47	1,28

4.4. Evaluación del estado de explotación

El coeficiente de capacidad útil (β) promedio obtenido mediante la ecuación (3.8) fue de 2,077. Dado que este valor es superior a 2, se concluye que el acuífero se encuentra en un estado de sobreexplotación, lo que indica que el nivel máximo registrado está por debajo del nivel crítico histórico.

Utilizando la ecuación (3.9) se calculó el nivel mínimo admisible, obteniendo un valor promedio de 3,957 m, lo que representa la cota por debajo de la cual no deberían descender los niveles para evitar daños irreversibles al acuífero.

4.5. Comparación de resultados y demanda actual

La comparación entre ambos métodos muestra una diferencia de 14,665 hm³ (aproximadamente 13,5 %), siendo el método de Bindeman más conservador (94,102 hm³) que el balance hídrico (108,767 hm³). Ambas estimaciones resultan inferiores a la demanda total anual de 111,354 hm³.

La actualización con respecto al estudio realizado en 2020 (Suárez, 2020), que también empleó el método de Bindeman, revela una disminución del recurso explotable en aproximadamente 6,568 hm³, evidenciando una tendencia al agotamiento de las reservas.

05 CONCLUSIONES

Se reevaluó el potencial hídrico de la cuenca subterránea Hanábana (CF1) mediante dos métodos independientes, determinándose que los recursos hídricos explotables oscilan entre 94,102 hm³/año (método de Bindeman) y 108,767 hm³/año (balance hídrico de acuífero), valores que resultan insuficientes para satisfacer la demanda total anual de 111,354 hm³. La aplicación del método de Bindeman permitió clasificar el acuífero como sobreexplotado ($\beta = 2,077$), indicando que el ritmo de extracción supera la capacidad de recarga natural del sistema. La comparación con estudios previos evidencia una disminución de 6,568 hm³ en el recurso explotable desde 2020,

confirmando una tendencia al agotamiento que, unida al régimen decreciente de precipitaciones observado, constituye una alerta crítica para la gestión del agua en el territorio. Se recomienda implementar medidas de gestión de la demanda, especialmente en el sector agrícola, así como monitorear continuamente la evolución de los niveles y la calidad del agua, prestando especial atención al avance de la intrusión salina en la zona costera.

06 REFERENCIAS

- Báez, E. G. (2020). *Análisis de procedimientos y metodologías para la evaluación y gestión de los recursos hídricos subterráneos* [Tesis]. Universidad de la República.
- Bindeman, N. N. (1963). *Evaluación de reservas de aguas subterráneas*. Editorial Nedra.
- Caraballo, M. P. (2012). *Manual de agua subterránea* (1st ed.).
- Cristo, N. M. (2023). El agua subterránea: Clave para abastecer a la población mundial. *UNAM Global Revista*.
- Departamento de Meteorología de Cienfuegos. (2016). Series históricas de temperatura y humedad.
- Fernández, C. d. (2012). *Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales*. Digital Universitaria Moa.
- Flores, H. (2021). Balance hidrológico.
- Marín, C. M. (2014). La energía del cambio [En línea].
- Peñalver, I. (1999). *Manual práctico de campo hidrogeológico*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Planos, E., Vega, R., & Guevara, A. (2013). *Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en cuba*. Instituto de Meteorología.
- Rodríguez, Y. S. (2018). *Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en la cuenca hanábana* [Tesis de Maestría]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Sánchez, R. d. I. C. (2009). *Evaluación cuantitativa de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca sagua la grande* [Tesis Doctoral]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Suárez, L. E. (2020). *Análisis cualitativo de la cuenca cf1 hanábana* [Tesis de Diploma]. Universidad de Cienfuegos.
- Valdés, A. O. (2011). Recursos hidráulicos subterráneos: Observaciones sobre su evaluación y gestión en cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 32(3).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Roxana Aymée Luis Winograd <https://orcid.org/0000-0002-4758-4045>

Daniela González Regalado <https://orcid.org/0009-0004-0641-3735>