

HIDROLOGÍA DEL CINTURÓN DE POLJES ARIGUANABO-CAÑAS-¿SAN JUAN? (CUBA) Y EL PROBLEMA DE LA GESTIÓN ORDENADA DE SUS RECURSOS HÍDRICOS

Leslie F. Molerio León¹

Ojo de Agua de Nico
Foto: Javier Yraola Rodríguez

Resumen:

Se describen los problemas hidrológicos de los importantes sistemas acuíferos cubanos Ariguanabo, Vento, Jaruco, Aguacate-M1, considerando que se trata de una cadena de poljes cársicos con la particular evolución y comportamiento del drenaje superficial y subterráneo. Bajo esta redefinición, cuyas propiedades geológicas, geomorfológicas e hidrológicas se discuten, se propone un grupo de medidas estructurales y no estructurales para contribuir a la gestión responsable y ordenada de sus importantes recursos hídricos, destinados mayoritariamente al abastecimiento de La Habana, ciudad capital de Cuba.

Palabras clave: Ariguanabo, Jaruco, polje, recursos hídricos, Vento

Abstract:

The main hydrologic problems of the important Cuban aquifer systems Ariguanabo, Vento, Jaruco, Aguacate-M1 are described considering they are karstic poljes with a particular evolution and behavior of its surface and underground drainage. Under this redefinition their geological, geomorphological and hydrological properties are discussed and a group of structural and non-structural measures are proposed for the responsible and ordered management of its water resources, mainly destined to supply La Habana, capital city of Cuba.

Keywords: Ariguanabo, Jaruco, polje, Vento, water resources

¹ Inversiones Gamma, S.A. Apartado de Correos 6246, CP 10400, Habana 6, La Habana Cuba.
E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

Introducción

Las tradicionalmente consideradas cuencas subterráneas Ariguanabo, Vento, Jaruco, Aguacate y M1² están conformadas por una cadena de poljes y valles decapitados orientadas de Oeste a Este desde la ciudad de Guanajay hasta la de Matanzas, siguiendo un eje central de unos 105 km de longitud (*fig. 1*)³ desde la divisoria occidental de la Laguna de Ariguanabo hasta el Valle del Río Cañas, donde descargan los manantiales Bello pero que, incluso, puede extenderse hasta la margen occidental del río San Juan, donde descarga el Manantial de La Gloria (Varela, Molerio y Guerra: 1978), que podría considerarse el límite oriental de todo el sistema de poljes y valles decapitados (*fig. 2*)⁴. El área acuífera es de aproximadamente 1757 km² con importantes recursos de agua subterránea, del orden de los 675 Hm³/año que, en su mayoría, se destinan al abastecimiento –para todos los usos- de La Habana, Capital de la República de Cuba, parcialmente a la ciudad de Matanzas (*fig. 3*) y, además, a numerosas ciudades y asentamientos en ese territorio. Los sistemas acuíferos cársicos fueron agrupados en la Región Cársica Depresión Almendares-San Juan (Molerio: 1975a; 2023).

Estos poljes cársicos de fondo plano y rodeados por rocas de baja permeabilidad más antiguas (pre-Neógenas) son cuencas geológicas en sí mismas, con espesores de las rocas mayormente carbonatadas carsificadas del Mioceno de varios centenares de metros de potencia, formando cubetas o depresiones de diferente forma y dimensiones, sobre todo de profundidad, cuyos ejes centrales han sido ligeramente desplazados probablemente por procesos tectónicos sin y post sedimentarios y que presentan fuertes cambios faciales laterales y verticales.

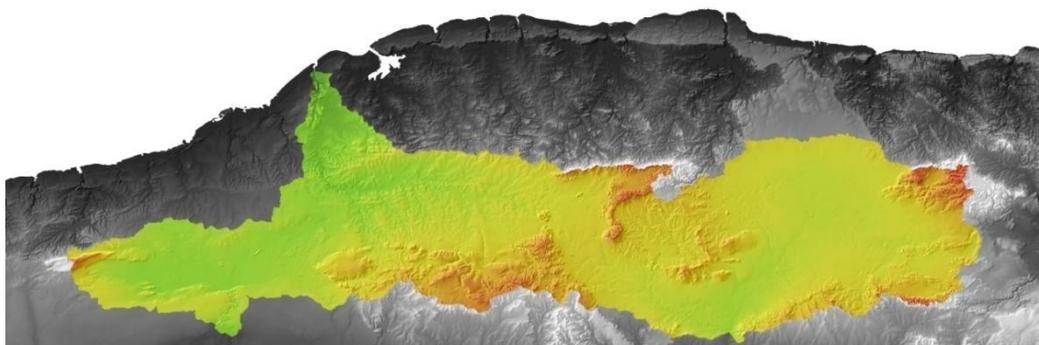


Fig.1: Modelo de relieve del Cinturón de Poljes Ariguanabo-Cañas incluyendo el sector norte de la cuenca fluvial Almendares y hasta el límite tradicional en la antigua cuenca Aguacate-San Agustín. Elaborado por Raydel Alonso.

² Seguimos la nomenclatura de INRH (2000)

³ Aquí se identifica, en la vertiente oeste, un acuífero cársico, activo al nivel del talweg, con varios niveles de cavernas emisoras que descargaron en drenaje convergente al río. El karst se ha desarrollado en margas calcáreas de la Fm Consuelo (Eoceno superior; Iturralde, 1966)

⁴ Esta proposición nuestra no ha sido comprobada

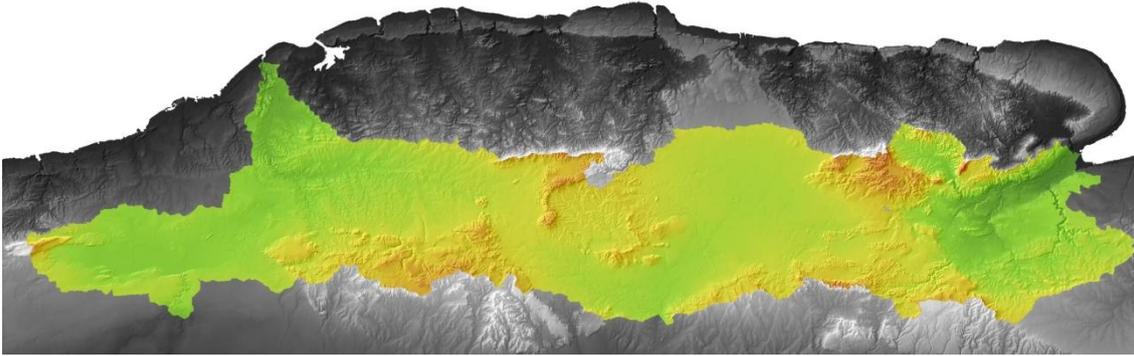


Fig.2: Modelo de relieve del Cinturón de Poljes Ariguanabo-San Juan incluyendo el sector norte de la cuenca fluvial Almendares Hasta la cuenca de San Juan, propuesta en este estudio como límite oriental del cinturón de poljes. Elaborado por Raydel Alonso.



Fig.3: Área de estudio

Leyenda

— Channels	EL CANGRE	MARIEL	VIA BLANCA
— fallas	EL COBRE	MARTIN MESA	VEDADO
DEPOSITOS ALUVIALES	LOMA EL AÑIL	PERLA	VERSALLES
APOLO	GUANAJAY	PUNTA BRAVA	Asociacion Gabro-Plagiogranitica
CAOBAS	GUINES	PEÑALVER	ANDESITA
LA CHARCA	JARUCO	Presa	BASALTO
CHIRINO	JABACO	DEPOSITOS PALUSTRE	PORFIDO ANDESITO BASALTICO(rocas)
COJIMAR	JAIMANITAS	RIO MAYA	Porfido andesito Basaltico
COLON	DEPOSITOS MARINOS	SANTA MARÍA DEL ROSARIO	SERPENTINITAS
CANIMAR	MERCEDES	SAO REDONDO	DACITAS
CAPDEVILA	DEPOSITOS MARINO-PALUSTRE	TINGUARO	GABROS
CONSUELO	MACANAL	TINAJITA	Limos arenosos
EL ABRA	MADRUGA	UNIVERSIDAD	

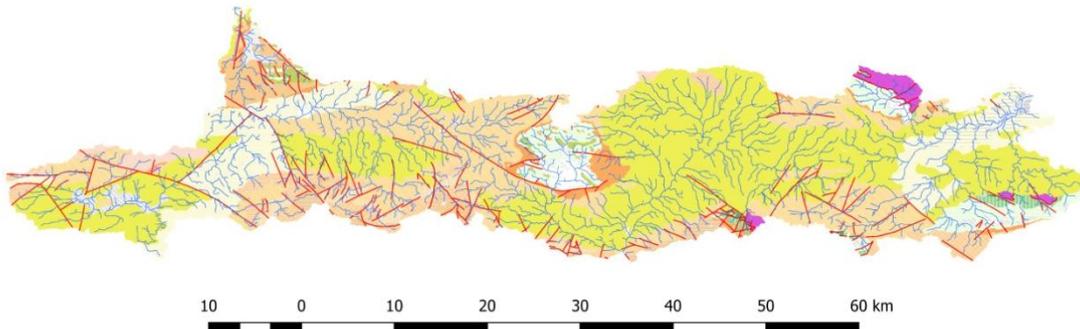


Fig.4: Geología de base del Cinturón de Poljes (Por razones de trabajo se incluye hasta el límite con el Valle del río San Juan). Elaborado por Raydel Alonso.

Calas profundas de hasta poco más de 300 metros perforadas en las décadas de 1960 y 1970 y cercanas a los 600 metros aún antes, permiten reconstruir un corte casi completo de sedimentos del Neógeno, con una carsificación y cavernamiento diferenciados por los cambios faciales (causante de la heterogeneidad del sistema acuífero) y la diferente competencia de las rocas a los esfuerzos tectónicos (responsables de la anisotropía de las unidades acuíferas) (fig. 4).

El relieve carsificado es muy joven, casi todo Cuaternario y Plioceno para las superficies denudativas que circundan a la laguna de Ariguanabo⁵ antigua (Magaz, 2018) lo que explica muchas de las características del funcionamiento hidrológico de estos sistemas que son necesarias para la gestión eficiente de sus recursos hídricos (fig. 5).

Egorov y Luege (1967) y Albear (1974) reconocieron cuencas ricas en agua subterránea en la parte central de la antigua provincia de La Habana (hoy compartidas entre Artemisa, Mayabeque y Matanzas); a saber: Vento, Ariguanabo, Jaruco-Aguacate y San José-Mampostón. Jaruco Aguacate se extiende hasta la parte occidental de la provincia actual de Matanzas y San José-Mampostón fue incluida por Albear.

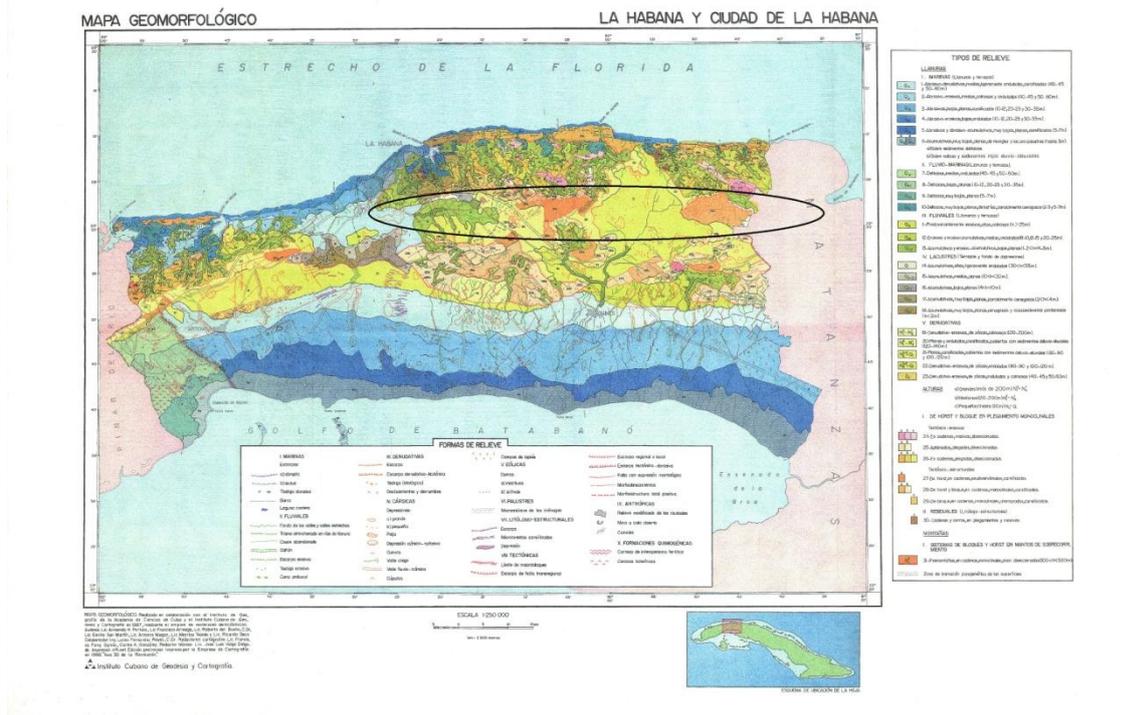


Fig.5: Área que comprende el cinturón de poljes, sobre el Mapa Geomorfológico de La Habana y Ciudad de La Habana a escala 1:250 000 (Portela: et al. 1988)

⁵ "...que tiene como dos leguas de superficie y como ocho varas en el punto más profundo; está al N. de San Antonio ..." según Felipe Poey (1849): Geografía de la Isla de Cuba, acompañado de un apéndice sobre la Geografía antigua. Imprenta del Artista, La Habana, 31: "Gran laguna" le llamaba de la Sagra en 1849 "Historia Física, Política y Natural de la Isla de Cuba. Tomo I, 51 Imprenta de Maulde y Renau. Paris. Según la RAE, 1 legua = 4 kilómetros; 1 vara = 0,836 metros

Reconocimientos

Este estudio es el resultado de muchos años de estudios y exploraciones en estos sistemas acuíferos en los que he compartido trabajos de campo, de gabinete y he recibido la entusiasta cooperación y comentarios de muchísimos colegas desde fechas tan tempranas como el año 1967. Es por ello ocasión propicia para poder agradecer a Manuel Acevedo González, Jesús Francisco de Albear, Alfredo Álvarez, Raydel Alonso, Dionisio Amor de Paz, Mercedes Arellano, Bárbara Ballagas, Gabriel Barceló, José Luis Batista, Juan Bobes, Carlos Borrego, Lorenzo Carvajal, Enrique Castellanos, Ramón Castro Ruz, Yasmani Ceballos, Andrés Díaz Arenas, José A. Díaz Machín, Félix Dilla, Pedro L. Dorticós del Río, Rafael Feitoo, Ernesto Flores, Osvaldo Gómez, Arturo González, Iván González, Yoermes González, Esteban Grau, Mario Guerra, Reinaldo Guerrero, Svetanka Guneva, José Evelio Gutiérrez, Julio Hernández, Rogelio Hernández, Manuel Iturralde-Vinent, Efrén Jáimez, Flor Jiménez, Sigilfredo Jiménez, Rosa María Leal, Ilya Levaski, Carlos Alberto Luaces, José R. Luege, Piotr Maloszeswski, Cecilia March, María del Carmen Martínez, Osvaldo Martínez, José Bienvenido Martínez, Bladimir Matos, Odalys Méndez, Teresita Morales, Kenya Núñez Cambra, Nikolai Oscotski, Viera Petrova, Eduardo Planos, Nyls Ponce, Alina Quintana, Juan Ricard, Jean Robaina, Francisco Rodríguez Cowan, Marta Rodríguez Lima, Reinaldo Rojas Consuegra, Katia del Rosario, Orlando Rovira, Alexei Rudovol, Ramón Sardiñas, Aftandil Tzirekitze, Julio J. Valdés, Ercilio Vento, Jaroslav Vrba, Peter Yankov y Javier Yraola. Especialmente a Luis A. Barinaga, Osvaldo Martínez, Carlos Alberto Luaces y Fermín Sarduy por invitarnos a examinar nuevamente los problemas hidrogeológicos de Ariguanabo, Vento y Jaruco. Y a Ana que, además de las muchas campañas de campo, revisó cuidadosamente el manuscrito.

Poljes: definición y tipología

El término polje es de origen eslavo y significa “campo”, lo que se debe a que constituían las mejores tierras llanas cultivables en el Karst Dinárico. El término fue traído a la literatura especializada por Jovan Cvijic (1893, 1895, 1918, 1924) quien, en un estudio ya clásico, describió con precisión su funcionamiento hidrológico.

La definición es compleja porque muchos términos de la hidrología y geomorfología del karst, hoy universales, provienen de denominaciones locales. Así fueron adoptados y generalizados sin que mediaran, muchas veces, conceptos rigurosos

y primando, como hace años señalamos, los términos descriptivos sobre los conceptos genéticos (Molerio y Valdés: 1975).

La definición clásica se debe a Cvijic (1893): *“Un polje es una gran cuenca cársica, de fondo plano alineada a lo largo de estratos en zonas tectónicas...que se diferencian de los valles ciegos alargados y en su mayoría sinuosos por su gran anchura, la coincidencia regular de su eje longitudinal con los estratos así como por la uniformidad del fondo, que no se ajusta al mismo eje direccional...algunos poljes están secos todo el año, otros se inundan estacionalmente y un pequeño número de poljes está inundado permanentemente. En cuanto a las condiciones hidrográficas se diferencian los siguientes tipos: seco (Troddenpoljen), inundado periódicamente (Periodischinundiertenpoljen) y poljes lacustres (Seepoljen)”*⁶

En la región clásica del Karst Dinárico, los poljes se definen como *“depressiones alargadas, de fondo plano, flancos abruptos alargados paralelamente a la dirección de las capas y se forman solamente en zonas dislocadas tectónicamente. Pueden estar secas, inundadas periódicamente o contener lagos. Presentan manantiales, estavelas, ríos, arroyos y sumideros. Su formación está relacionada con plegamientos (anticlinales erosionados o sinclinales) o fallas que crucen a la formación de depresiones cerradas por la intersección de cursos fluviales y ascenso de las partes bajas del terreno...”* (Herak: 1976).

El concepto de polje ha sido revisado por varios autores, desde el propio Cvijic (1924) hasta Roglic (1952, 1964, 1965, 1974), Gams (1969, 1978), Jennings (1971), Sweeting (1973), Ford y Williams (1989), Silvestru (1995)⁷, Bonacci (2013). El propio Gams (1978) dedicó un enjundioso análisis al tema. Para Jakucs (1977) y Nicod (2003), los poljes no son las formas principales del karst, pero decididamente las más típicas desde el punto de vista estructural, pero añadiríamos, también desde el punto de vista hidrológico⁸ (Molerio: 1975b, 1980, 2013).

Mucha discusión (véanse los trabajos también clásicos de Lehmann en la bibliografía) existe sin un común acuerdo respecto a las variedades geomorfológicas de los poljes (Fig.6). Gran parte de ello se debe, precisamente a que se trata de un término de la toponimia local que, básicamente, se refiere a la capacidad de cultivo del suelo, no

⁶ En nuestros ejemplos, de manera general: Inundado permanentemente, Ariguanabo; periódicamente, Vento y seco, Jaruco

⁷ Silvestru comenta poco más de media docena de conceptos

⁸ En realidad, se consideran las dolinas y el lapiés (llamado en Cuba “diente de perro”, las formas diagnóstico del karst



a la depresión por sí misma y, por otro lado debido a que la influencia de la Teoría Cíclica del Relieve de Davis le hizo pensar en una errónea evolución lineal dolina→uvala→polje (Molerio: 1973; Frelih: 2003; Calic: 2011), en la que, por otro lado existe –sin dudas- una fuerte relación de asociación, hecho ya destacado por su contemporáneo Sanders (1921). Concorre una relación de asociación, pero no evolutiva y, de hecho, como ha señalado Sweeting (1973:192), “*los procesos y los eventos históricos que han originado los poljes en el Karst Dinárico han tenido lugar en unas otras pocas regiones del mundo, por lo que de muchas maneras los poljes en el Karst son únicos*”.

En Cuba, sobre todo en las montañas de Cuba Occidental, los trabajos de Lehmann y, en general, el enfoque clima morfogenético dominante en la segunda mitad del siglo XX enaltecieron la confusión, al introducirse conceptos moldeados por la Teoría de Davis y se asignaron formas de relieve específicas a estadios particulares de la evolución del relieve. La introducción también de vocablos específicos de la región para designar estas formas, recordado por Núñez⁹ (1964) y formalmente propuestos por Acevedo (1971) fue más útil, utilizándose –pero solo muy limitadamente (Gutiérrez y Rivero: 2002; Molerio: 2021)- los términos de “Hoyos de Montaña” y “Hoyos de Terreno” para designar, realmente, no las dolinas excavadas en las montañas sino aquellos valles entre las serranías mogóticas y las planicies excavadas en el contacto entre las rocas carsificadas y las impermeables (llamadas “valles intramontanos” por los geógrafos clásicos cubanos (Massip e Isalgué: 1942; Marrero: 1946; Núñez: 1954).

Polje de borde (marginal)

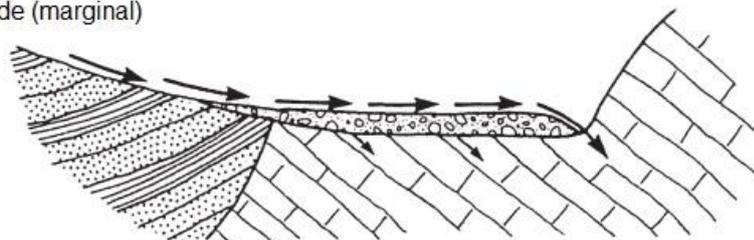


Fig.6a: Polje de borde según Ford y Williams (1989)

⁹Poljas y no poljes los designaba este autor.

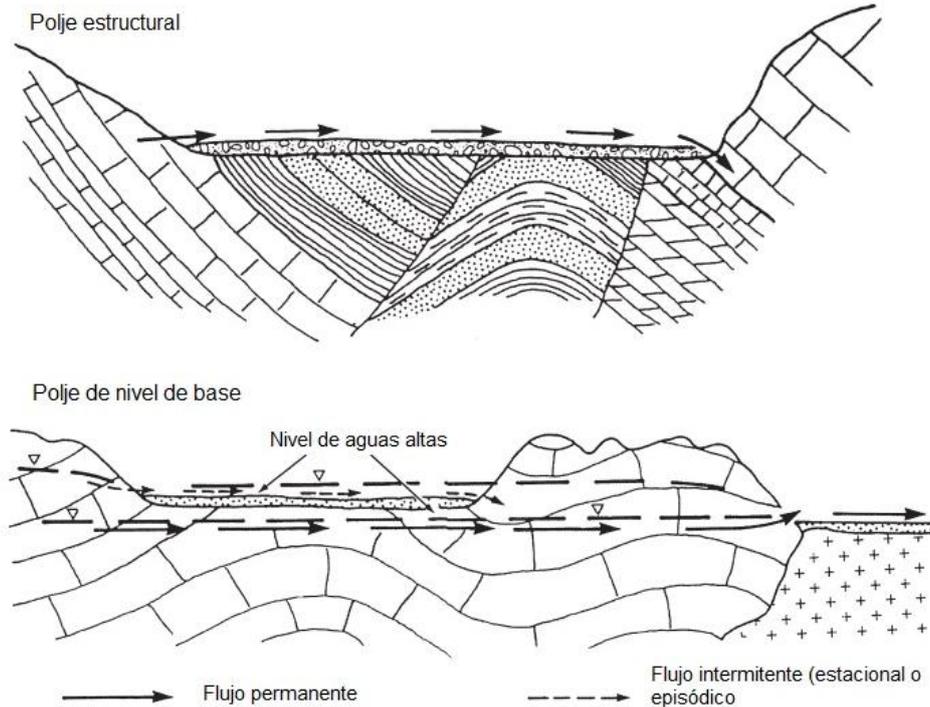


Fig.6b: Polje estructural y polje de nivel de base según Ford y Williams (1989)

Estos valles intramontanos fueron denominados “Randpoljen” por Lehmann. Pero se abandonó el término polje, la discusión quedó inconclusa y aun hoy se denominan “poljes” a “dolinas” y los verdaderos “poljes” ni siquiera se mencionan. Magaz (2018) adopta los términos de “depresiones intrakársticas” o de “hoyos intramontanos” para esta región occidental, muy diferente a los que ocurren en Cuba Central. Pero en todos los casos, el análisis se ha circunscrito a zonas montañosas. Y, como señala Gams (1978) la formación de los poljes es seguramente poligenética, bajo fuertes patrones tectónicos y de disolución de las rocas.

La identificación de la región de estudio como una cadena de poljes se ha ido adquiriendo de manera gradual. Con particulares condiciones geológicas e hidrológicas; sobre todo en lo que concierne a proceso de formación del escurrimiento superficial y subterráneo, de adquisición de la composición química e isotópica y a las muy complejas relaciones hidráulicas entre ellos, las componentes del ahora llamado Cinturón de Poljes, la clásica cuenca Jaruco fue identificada como un polje ya en 1975 (Molerio, 1975c; Molerio y Guerra, 1980; Molerio et al., 1993) y así tratada en el análisis hidrodinámico específico y, particularmente de la composición isotópica de sus aguas subterráneas; Vento, por primera vez, por Vrba (1967) y con cierto detalle muchos años después (Molerio, 2008; Molerio, Pin y Guerra: 2007). Ariguanabo en 2013 (Molerio, Guerra y Leal: 2013), este último, identificado por Magaz y Portela (2016) como un hundimiento de semigraben relativo.

En una fecha tan temprana como 1918, ya Cvijic estableció que el fundamento del desarrollo del karst dependía del modo en que se organizaba el drenaje superficial y subterráneo en estas comarcas¹⁰. Las superficies planas del fondo de los poljes eran consecuencia de su inundación periódica.

La necesidad social y económica de controlarlas orientó, desde entonces, la mayor parte de las investigaciones en las zonas del karst clásico. Cvijic relacionó estos procesos con las tres zonas hidrológicas que el diferenció; a saber: a) la zona superior en la que los poljes nunca se inundan; b) la intermedia en la que se inundan periódicamente y c) la inferior en la que siempre están inundadas. *“Cada polje e incluso cada parte de un polje tiene su propio régimen hidrológico, por lo que no hay una correlación exacta con los niveles de agua”* (Sweeting: 1973:207).

La propuesta de esta autora tipifica los poljes en a) Poljes completamente rodeados por calizas, con rocas impermeables en el fondo y b) Poljes de borde (rand) en el contacto entre las calizas y las rocas impermeables formados por erosión diferencial considerando que *“los poljes son llanuras acumulativas dentro de depresiones en las regiones cársicas...[y a los efectos del Trópico Húmedo]...los regímenes fuertemente estacionales de lluvia asisten a la función de niveles de inundación locales que dan lugar a la corrosión de borde y la planación por disolución...por ello, las depresiones del tipo de polje exhiben un desarrollo horizontal en lugar del vertical, como en el desarrollo de las dolinas...”*

Gams (1978) deja clara la diversidad de criterios para tipificar y resume cinco tipos fundamentales: a) polje de borde; b) de desbordamiento; c) periféricos; d) de piedemonte y e) poljes en el nivel piezométrico. Los de borde (Randpoljen de Lehmann) se forman en el contacto entre las rocas permeables e impermeables que drenan al polje. Los de desbordamiento pueden tener tanto una franja o todo el fondo construido por rocas impermeables o sedimentos semipermeables que actúan como una barrera para que las aguas subterráneas emerjan en un sector y se sumerjan en el otro. En los poljes periféricos los sedimentos impermeables tienen una posición central o muy cerca del centro del polje y drenan en todas direcciones hacia los ponores en las calizas circundantes. Un polje de piedemonte se localiza en los aluviones derivados de climas glaciales o periglaciales al pie de

¹⁰ « Si une dépression karstique est approfondie jusqu'au-dessous du niveau de l'eau stagnante ou de la nappe d'eau du karst, elle sera constamment remplie d'eau. Ce niveau de l'eau stagnante monte pendant la période des pluies et il peut alors atteindre le fond de poljes karstiques, qui seront ainsi périodiquement inondés. Par ces fluctuations du niveau de la nappe d'eau karstique peuvent être éclaircis tous les phénomènes hydrographiques des poljes karstiques... » (Cvijic, 1918: 381-382)

una montaña. Los poljes de nivel piezométrico presentan su fondo inundado en aguas altas. Este nivel piezométrico está sostenido por un río o el mar a muchos kilómetros del polje.

De estas consideraciones geomorfológicas se deriva el dominio absoluto del drenaje en su desarrollo (aun cuando se considere que los poljes no son formas típicamente cársticas). En otros términos, la observación de una hidrología típica de los poljes, asociada a los estímulos de lluvia y al modo en que se organiza el drenaje superficial y subterráneo en estas formas (generalmente aparatos cársticos *per se*) es de la mayor trascendencia para la gestión de sus recursos hidráulicos. No considerar este hecho y no tratar estos poljes y su hidrodinámica bajo estas consideraciones ha afectado considerablemente la eficiencia en la gestión de sus recursos hidráulicos en aspectos tan importantes como el control de inundaciones (Molerio y Feitoo: 1981; Beilin: 1984; Hernández, 2022) el aprovechamiento racional de sus aguas subterráneas (que ha conducido incluso a la sobreexplotación de sus recursos), la regulación artificial del escurrimiento, los cambios en la calidad de las aguas en muchos lugares del país y, en particular, en la región de estudio (Molerio: 2006, 2007). En nuestra tipología (Molerio: 2013) se consideran los tipos genéticos y funcionamiento hidrológicos que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de poljes y su funcionamiento hidrológico (Molerio, 2013)

Subtipo	Componentes	Definición	Funcionamiento hidrológico
Simples	Marginales o de contacto	Desarrollados en el contacto entre rocas carsificables y no carsificables por procesos de disolución y de erosión predominantemente diferencial.	Permanente Estacional Episódico Inactivo: Merofósil Holofósil
	Corrosivos	Debidas a procesos predominantemente de corrosión cárstica.	
	De hundimiento o subsidencia	Formadas por subsidencia progresiva de la cuencageológica o parte de ella	
	Sufosivos	Formadas por asentamiento progresivo o brusco de su fondo debido a procesos de sufusión.	
Poligénicos o Compuestos	Lacustres	Formadas por erosión lateral y flujo helicoidal en sistemas lacustres. La fase lacustre es típica de la evolución hidrológica de los poljes.	
	De conjugación o coalescentes	Debidas a procesos predominantemente de corrosión cárstica y/o a la coalescencia de varias uvalas y campos de dolinas.	

Los modelos conceptuales geológicos e hidrológicos

Esta región, que comprende la parte central de las provincias de Artemisa, La Habana, Mayabeque y la porción noroccidental de la provincia de Matanzas constituye una sucesión de poljes en diferentes estadios evolutivos que la convierten en una de las regiones cársicas más importantes y complejas del país, con una importancia económica extraordinaria y una inigualable riqueza acuífera. Prácticamente sin corrientes fluviales que la disecten, aquí se encuentran tres de las cuatro cuencas de aguas subterráneas que abastecen la capital de Cuba, La Habana (2,13 millones de habitantes): Ariguanabo, Vento, Jaruco-Aguacate y San Juan-San Agustín- Cañas. La importancia social, económica y política de la gestión eficiente de sus recursos hídricos es más que obvia. La vulnerabilidad del importante acuífero de Vento ha sido evaluada recientemente por Suárez et al., (2019).

Desde el punto de vista estructural se ha mencionado que está constituida por varias cuencas geológicas donde el espesor de los sedimentos carbonatadas alcanza un poco más de 600 metros. Son cuencas sedimentarias en el sentido geológico de la palabra; esto es que sus rocas acuíferas se depositaron sobre los paleo relieves fundamentalmente paleogénicos; relieves que, a juzgar por los mapas de isopacas del Neógeno (a escala 1:1 000 000) y de los acuíferos miocénicos (1:250 000) que elaboramos entre 1974 y 1976 (Molerio y Feitoo: 1974; Molerio y Hernández: 1976) no debió ser muy regular, puesto que la forma y dimensiones de las pequeñas cuencas y su composición litológica tan variable muestran tanto espesores de centenares de metros (perforados en calas de exploración) como muy someros, de hasta menos de 50 metros y casi contiguos, con sus ejes desplazados de la vertical, indicando tanto perturbaciones tectónicas sinsedimentarias como post deposicionales (*fig.7*).

También están relacionadas con extensas zonas de fallas transversales en combinación con depresiones de graben relativo (Magaz, 2018) lo cual constituiría otro modelo geológico en el que serían tectónicos los límites entre las diferentes unidades hidrogeológicas. Ariguanabo, Vento y Jaruco son, entonces, depresiones estructurales de base paleogénica rellenas por potentes series de sedimentos neogénicos carbonatados, carbonatado-terrágenos y terrígenos en los que se ha desarrollado grandes poljes cuya superficie hoy se expresa en una llanura denudativa de edad N_2^3 -Q. IGP (2014) señala la cuenca geológica Almendares-San Juan, como uno de los grandes centros de deposición neogénica (depocentro) del país.

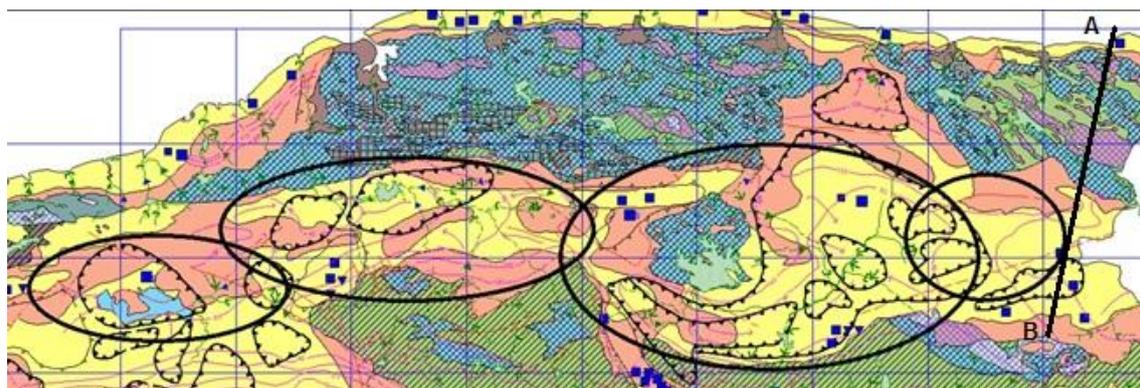


Fig.7: Cuencas sinsedimentarias principales en el Cinturón de Poljes (sobre la base del Mapa Hidrogeológico de Cuba 1:250000; INRH, 2000). Se señala el perfil de la Fig. 9

Los poljes son sistemas holocárcicos en los que se reconocen zonaciones hidrodinámicas completas y bien desarrolladas¹¹. El más joven de estos grandes poljes es el de Ariguanabo, que aún conserva su fase lacustre activa¹² (Quintana et al., 1999; Jiménez y Molerio, 2006). Las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo constituyen la divisoria sur de la región.

Fundamental para la gestión de los recursos hídricos es no perder de vista que la variedad de facies y transiciones faciales (verticales y horizontales) de las rocas carbonatadas que forman los acuíferos miocénicos y la estructura tectónica diferenciadas de los sistemas acuíferos son los responsables de la heterogeneidad y anisotropía de las propiedades físicas de estos materiales y que afectan, de distinta manera la recarga, movimiento y extracción de las aguas así como controlan los procesos de adquisición de la composición química e isotópicas de las aguas (incluida la calidad de las mismas).

La composición litológica mayoritaria de los acuíferos miocénicos cubanos, donde radica el mayor potencial de aguas subterráneas, se corresponde –básicamente en la zona de estudio- con las Formaciones Jaruco (sinonimia con Colón y Husillo), Cojímar y Güines (siguiendo a IGP, 2014). El paquete litológico es sumamente heterogéneo, indicador de complejas relaciones hidráulicas entre las diferentes facies y, obviamente, de la variabilidad de la conductividad hidráulica. Las relaciones estratigráficas según Iturralde (2021) se muestra en la fig. 8.

¹¹ Es decir, presentan cuatro zonas hidrodinámicas, de arriba abajo en el corte: 1) zona no saturada (en el que se encuentra también el epikarst); 2) zona de fluctuaciones del nivel piezométrico; 3) zona saturada y 4) zona de circulación profunda, tal y como fuese sintetizado por Sokolov (1967)

¹² El sistemático descenso de los niveles de agua en la Laguna de Ariguanabo y su avenamiento se debe a una compleja y confusa mezcla de sequías prolongadas con una intensificación de la explotación de las aguas subterráneas moldeada, en parte por una no muy bien definida relación hidráulica entre este acuífero y el contiguo de Vento.

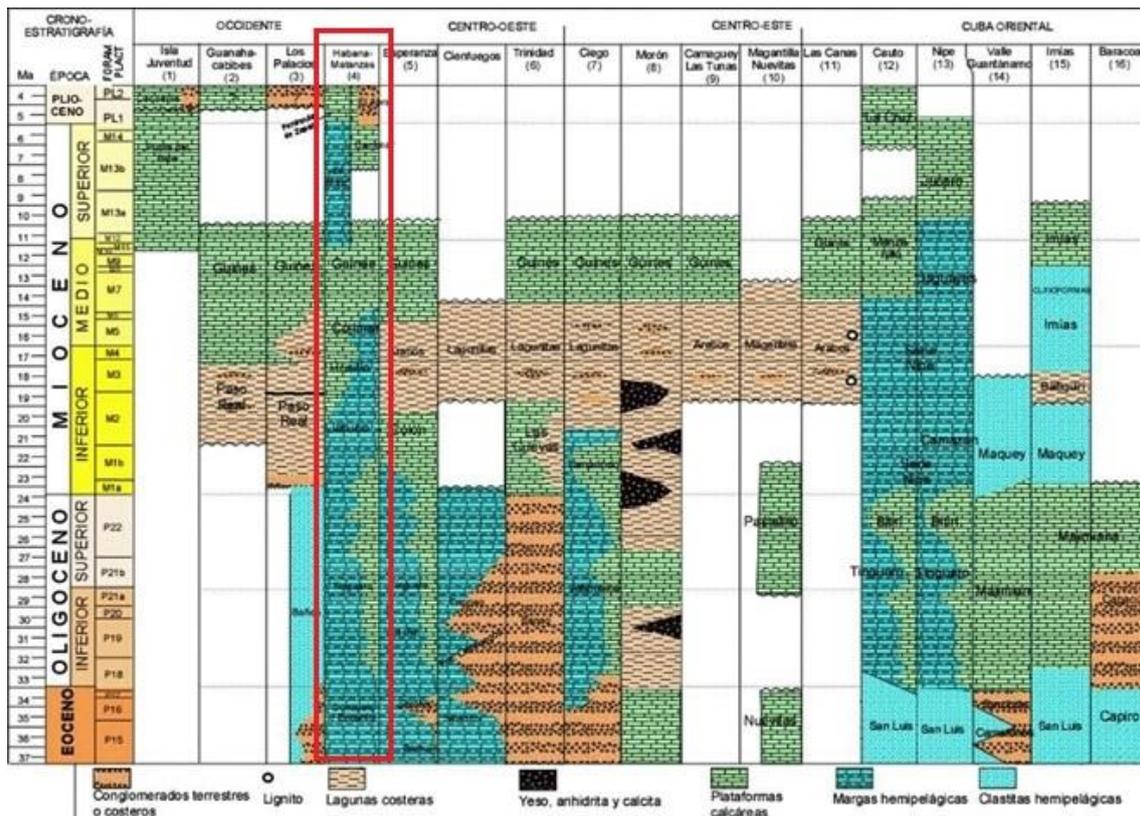


Fig.8: Columna estratigráfica del Terciario (según Iturralde, 2021).
El área de interés de este estudio se resalta enmarcada en rojo.

Fm. Jaruco, de edad Oligoceno Superior, parte alta - Mioceno Inferior está compuesta por calizas biodetríticas arcillosas frecuentemente con grandes lepidocyclinas, interestratificadas con margas. Subordinadamente se observan calizas arrecifales, calciruditas y calcarenitas. El espesor varía entre 60 y 240 m. **Colón**, con un espesor no mayor de 65 m presenta cuatro facies: I. Biocalcarenitas y biocalciruditas finas de matriz margosa con lepidocyclinas y heterosteginas, calciruditas finas de matriz micrítica y brechas bioclásticas, formadas principalmente por fragmentos de corales. II. Calizas biomicríticas con lepidocyclinas. III. Areniscas polymicticas de matriz calcáreo-arcillosa o arcillosocalcárea. IV. Margas y calcilutitas cretosas que se interestratifican con calcarenitas y calciruditas.

Cojímar, por su parte, de edad Mioceno Inferior, parte alta - Mioceno Medio, parte baja, con una potencia entre 60 y casi 400 m, está compuesta por “*margas calcáreas, arcillosas, que transicionan hasta margas arenáceas y a veces nodulares, de colores gris a crema oscuro, o amarillo blancuzco. Calizas biodetríticas arcillosas de grano fino a medio, calcarenitas de matriz margosa y arcillas. En las margas,*

principalmente, se encuentran restos de moluscos, peces, equinodermos y varios tipos de microfósiles” (IGP, 2014: 128).

Güines, del Mioceno inferior parte alta al Mioceno superior parte baja y con un espesor entre 50 y 1670 metros, se integra por “calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohémicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. Por lo general, son masivas y, más raramente, estratificadas”.

Luego entonces, el término de “cuenca” adquiere otra connotación, ahora en el dominio geológico. No son cuencas sedimentarias independientes, sino una sucesión de ellas. Algunas muy estables muestran una sistemática neritificación de las facies en el corte geológico, como hace años señaló Iturralde (1971).

Es un complejo en el que se suceden a lo largo de diferentes ejes estructurales, muchas pequeñas estructuras sedimentarias. La *fig. 9* (tomada de Albear e Iturralde, 1985a) muestra, en la zona enmarcada, el corte de los sedimentos de cobertura neogénica (CR, Formación Cojimar y HS, Formación Husillo) en la zona del acuífero Jaruco-Aguacate acomodada sobre el Paleógeno de Formación Universidad (UN). La *Fig. 10* muestra la distribución de las formaciones de la Cobertura Neoautóctona en diferentes regiones de Cuba según Franco y Regalado (1997).

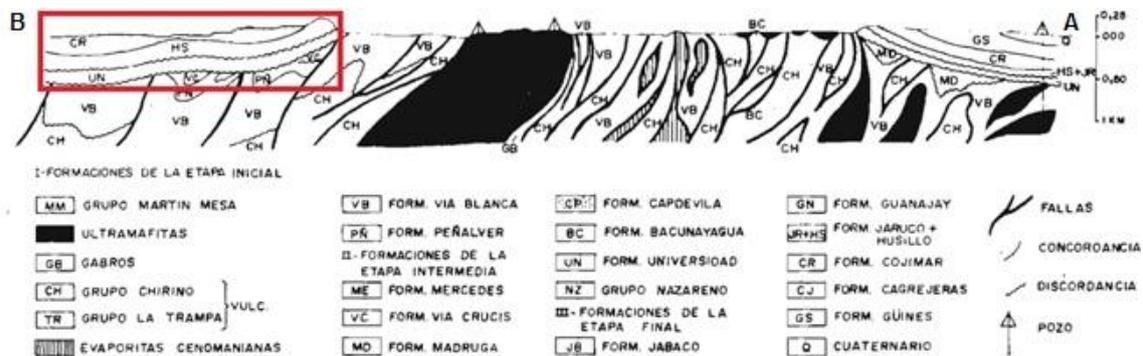


Fig.9: El sector enmarcado muestra la disposición de las cuencas sedimentarias de la cobertura Neogénica en un sector del Polje Jaruco Aguacate (Albear e Iturralde, 1985a). Nótese los acñamientos laterales y la forma de las depresiones. Se trata de una zona de subsidencia moderada (Iturralde, 1978)

A principios del siglo pasado y, durante muchos años, fue considerado un sinclinorio. Si no el primero, Palmer (1934) fue uno de los primeros en utilizar el



término para definir el extenso sinclinal¹³ al sur del anticlinal Habana-Matanzas cuyo eje se extiende desde Calabazar, a lo largo del río Almendares hacia el este atravesando cuatro Caminos, Tapaste, Jaruco, Aguacate, el valle del río San Juan hasta la Bahía de Matanzas que sería su terminación oriental (:38). Así fue recogido por Massip e Isalgué (1942) y la mayoría de los geógrafos clásicos cubanos (Marrero, 1946; Núñez, 1954). Incluso en la primera síntesis de la geología de Cuba (Judoley et al.: 1964) se mantiene el término de Sinclinorio Almendares San Juan para referirse a ese territorio y Núñez, Panos y Stelcl (1968), resaltan su importancia hidrogeológica: “Las estructuras sinclinales carsificadas del sub-tipo cársico discutido son generalmente ricas en cuencas de aguas cársicas subterráneas de importancia extraordinaria (por ejemplo, la cuenca de Vento, la cuenca de Catalina de Güines¹⁴ y otras).”



Fig.10: Formaciones de la Cobertura Neogénica (según Franco y Regalado, 1997)

En el concepto clásico, Marrero (1946) describe que “el sinclinal Almendares-San Juan se extiende desde Wajay hasta la bahía de Matanzas... Señala Brödermann (véase fig. 11) que un levantamiento transversal –de sur a norte- en la zona comprendida entre Jaruco y Nazareno, dividió en dos el sinclinal; la porción oriental continuó llevando sus aguas al San Juan, en tanto que las corrientes de la porción occidental cambiaron su dirección hacia el oeste, formando un gran lago al oeste de Calabazar. Las aguas de este lago, al desbordarse, erodaron el cauce del actual Almendares, entre Calabazar y Vento. La antigua “laguna de Calabazar” fue desaguando a través del Almendares y es probable que sus últimos restos constituyan hoy la laguna de Ariguanabo. La existencia de esta laguna no se explica porque se haya formado en una depresión, como algunos han afirmado, ya que se encuentra en una estructura anticlinal y a 59 metros sobre el nivel del mar, Brödermann estima que su existencia se debe a la impermeabilidad de las rocas del Oligoceno que forman su cuenca.”

¹³ Brödermann (1945) escribió “existe un gran sinclinal nombrado Almendares-San Juan por Palmer, que constituye la mayor cuenca hidrográfica de la provincia [de La Habana]”.

¹⁴ Jaruco, en sentido estricto

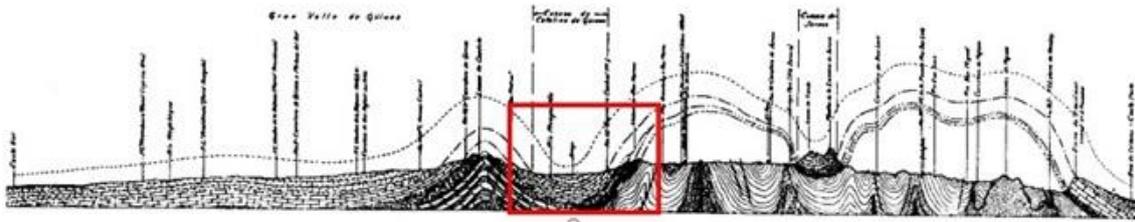


Fig.11: Corte del llamado sinclinorio Almendares-San Juan a la altura del polje Jaruco (enmarcado en rojo) tomado de Brödermann, 1940)

Brönniman y Rigassi (1963) también comparten el concepto de estructura sinclinal para Vento. Judoley et al. (1964) describen el entonces llamado Sinclinorium Almendares-San Juan como una estructura “cuyo eje está compuestas por “calizas miocénicos y en los flancos del cual, concordantemente, yacen las rocas del Oligoceno y eoceno. La longitud del sinclinorio alcanza 120 km y la anchura (hasta los afloramientos del Mioceno) alcanza 17 km. El eje tiene numerosos pliegues y su plano horizontal es algo curvo.”

Para Brödermann (1940), “la cuenca hidrológica de Vento ocupa la base de un sinclinal comprendido entre dos grandes anticlinales paralelos, cuyo sinclinal se encuentra interrumpido en la parte Este por una estructura casi perpendicular...que le sirve de límite; y por el Oeste, también por una estructura casi perpendicular; es decir que la cuenca propiamente dicha...se encuentra encerrada y bordeada por terrenos más elevados...que forman parte laterales de flancos anticlinales. El sinclinal de Vento, que pudiéramos denominar “Vento Jaruco” fue afectado al Este de Tapaste por el anticlinal ‘San Rafael-Casiguas’ que produce un levantamiento mayor de eje del sinclinal en los alrededores del lugar conocido por la Jaula, dividiendo la cuenca en dos, una que corre al Este “Cuenca de Jaruco” y otro al Oeste que denominamos ‘Cuenca de Vento’ del ‘Almendares’ o de ‘Vento-Tapaste’...el eje o axial de esta cuenca es inclinado y tiene su mayor elevación en Tapaste, y su menor altura en Vento, produciéndose un gradiente hidráulico de Tapaste a Vento...”(figs 12 y 13).

La cuenca subterránea de Ariguanabo, según Albear (1974), “no coincide exactamente con una estructura sinclinal única y bien definida”, sino que la define como “una depresión terciaria con estructura de buzamientos suaves, ero afectada por plegamientos u ondulaciones de mediana magnitud con fracturas y fallas limitadas, algunas de ellas consecuencia de tectonismos locales o de las últimas emersiones sufridas por la Isla.”

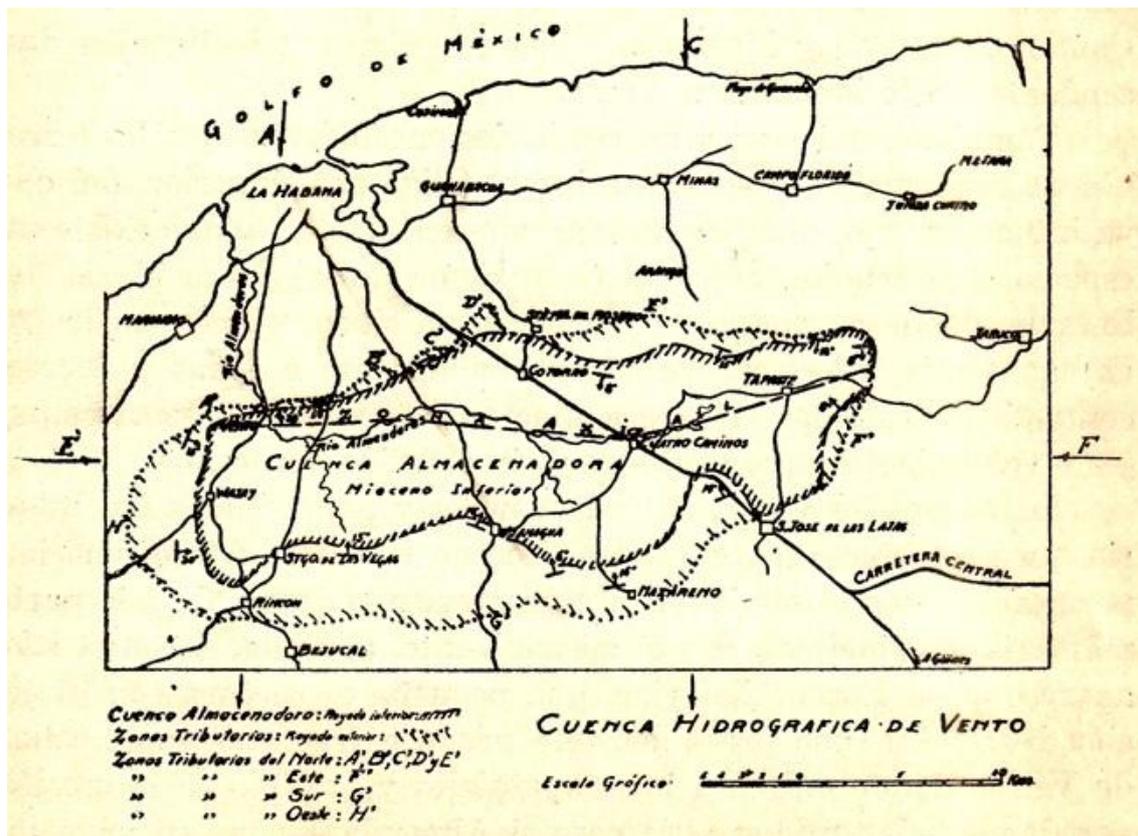


Fig.12: Cuenca de Vento (según Brödermann, 1940)

Análisis más completos y rigurosos han demostrado que la región tiene una estructura tectónica diferente. En el contexto que tratamos, aceptar que no es un sinclinatorio tiene unas implicaciones hidrogeológicas importantísimas pues modifica completamente el modelo conceptual del acuífero y, en consecuencia, el modo en que se evalúan y gestionan sus recursos. Autores más recientes (Albear e Iturralde, 1977a, 1977b, 1977c, 1985a, 1985b; Albear et al., 1985; Portela et al.: 1989; Magaz: 2018) redefinen la estructura y otros como Gutiérrez y Rivero (1999) no la reconocen.

Esas distinciones internas exigen suprimir el concepto hidrológico de cuenca (sobre todo, de cuenca única) y sustituirlo por el de sistema acuífero (en realidad, múltiples sistemas acuíferos), con sus particulares relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas enmarcadas no solo en el dominio espacial, sino en el temporal y, además por sus particulares condiciones de alimentación, movimiento y descarga de las aguas subterráneas, la hidrodinámica de su funcionamiento y de sus relaciones mutuas, los procesos que rigen la adquisición de su composición química e isotópica, la particular estructura del campo de propiedades físicas y, en suma, a la diferenciación de sus recursos. Esto es una asignatura pendiente, pero los resultados obtenidos en los últimos años, aplicando técnicas geomatemáticas más precisas, van



confirmando y permitiendo descubrir relaciones hidráulicas e hidrodinámicas a veces insospechadas. Estos resultados deben ser incorporados a la gestión.

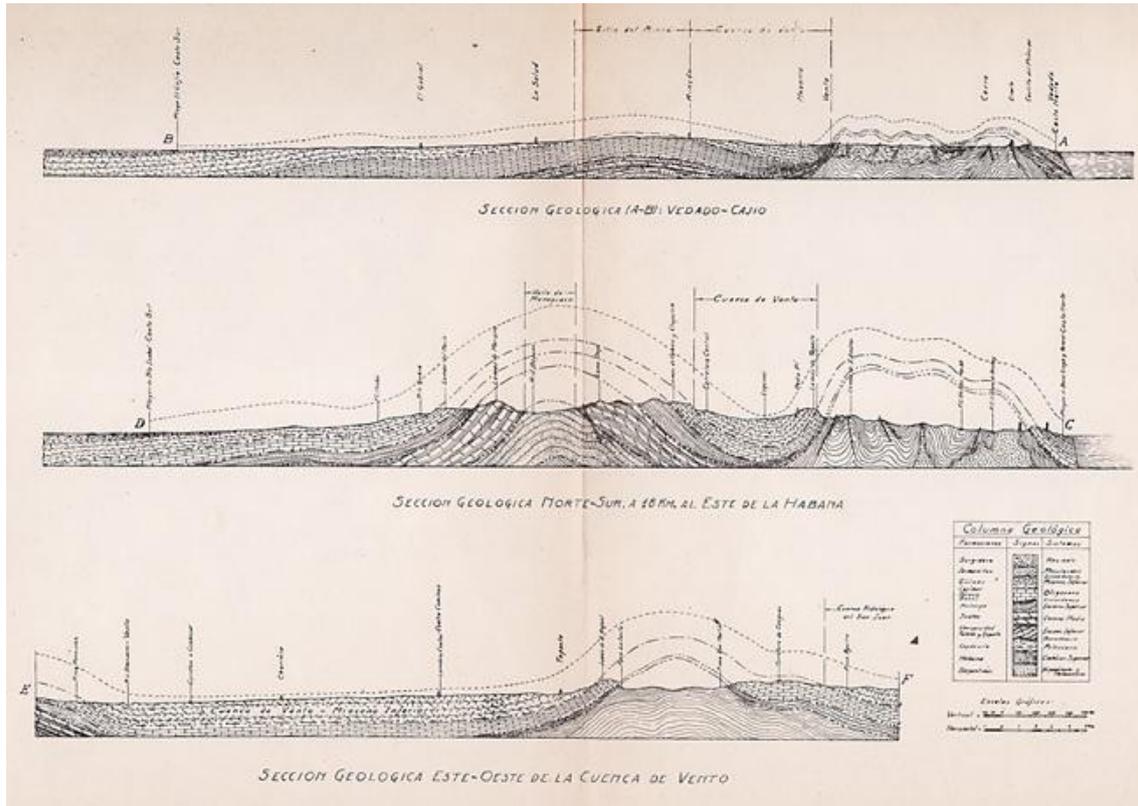


Fig.13: Perfiles geológicos de la Cuenca de Vento (según Brödermann, 1940)

Conexiones superficiales y subterráneas

Tampoco son cuencas únicas en el sentido hidrológico. Presentan sectores endorreicos como exorreicos y todos los poljes del Cinturón tienen descargas y flujos laterales superficiales y subterráneos fuera de sus fronteras. Los poljes presentan importantes difluencias subterráneas y superficiales que, por su parte, no están bien estudiadas (fig. 14).

Ariguanabo presenta, al menos, tres zonas de descarga, dos de ellas subterráneas. Una de estas se encuentra al sur, donde luego que el río San Antonio de los Baños se sumerge en una caverna al sur de la ciudad del mismo nombre (fig. 15), enlaza sus aguas con el acuífero de la Cuenca Sur (fig. 16; Molerio, 1978, 2000a; Molerio y Flores: 1995; Molerio et al.: 1999; Leal, Guerra y Molerio: 2003; Molerio, Guerra y Leal: 2013). Pero igual está la compleja relación hidráulica entre el río Govea y la Laguna donde los flujos se reportan que discurren en una dirección y la opuesta en determinadas épocas del año (Molerio et al.: 1980) y que, en la zona de contacto con la laguna y



donde nacía el río San Antonio o Ariguanabo se encontraba la Ciénaga de Marco Ramírez (fig. 17).

La otra zona de descarga, al noroeste incluye la compleja conexión de Ariguanabo con Vento (fig. 18) que, a su vez, descarga por los Manantiales del mismo nombre, tributario del río Almendares. Brödermann (1940) no consideraba que Ariguanabo alimentase a Vento y menciona “*los terrenos impermeables de la Laguna de Ariguanabo, [...los...] hemos excluido de la cuenca tributaria (se refiere a la de Vento), por carecer de toda conexión con la cuenca colectora y solo en los casos excepcionales de gran elevación del nivel de las aguas, llega a comunicarse con la referida cuenca.*” Y más adelante “*...no aparece relación alguna entre esa Laguna y la cuenca de Vento.*”

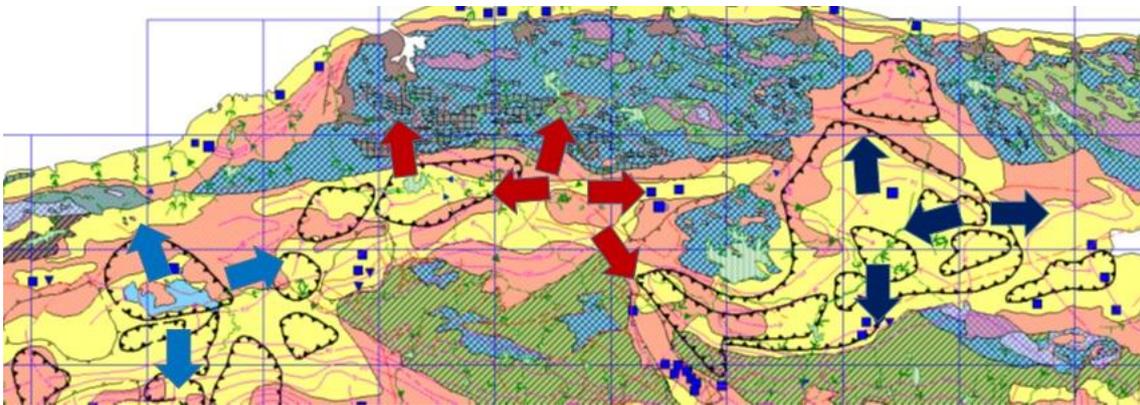


Fig. 14: Esquema general de las difluencias superficiales y subterráneas del sistema de poljes.



Fig. 15: Sumidero del río Ariguanabo o San Antonio en 1900.
Fuente: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>

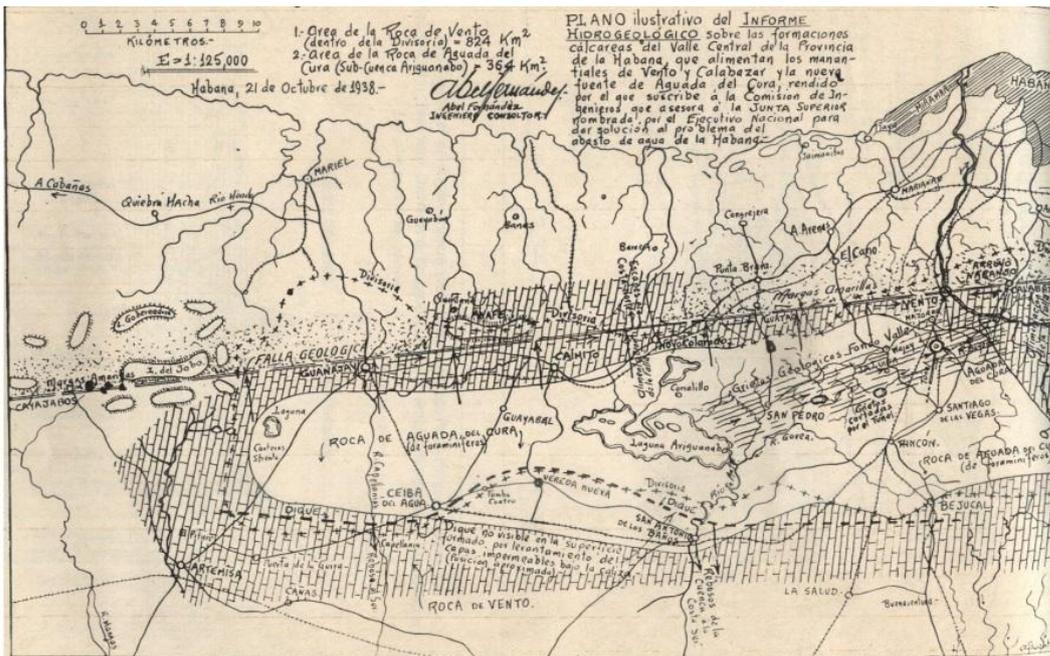


Fig. 16: Esquema general de circulación superficial y subterránea del río San Antonio, descarga superficial natural meridional de la Laguna de Ariguanabo. (Véase también Jáimez, Guerra y Álvarez, 2023 para una visión más amplia del problema).



Fig. 17: Humedal de Marco Ramírez cartografiado por el ingeniero Abel Fernández Simón en 1931

Fig. 18: Zona de conexión subterránea entre Ariguanabo y Vento descrita por el ingeniero Fernández Simón en 1938.





Basa su argumento en que *“la Laguna de Ariguanabo...forma parte de la continuación hacia occidente de la Provincia [entonces de La Habana] el cual es de poca importancia , y como ya se expresa al tratar del mismo, se halla también expuesto por pequeños movimientos orogenéticos, como sucede en las alrededores de la finca la Gía y Torrens, donde aparecen las formaciones Cretácica y Eoceno y que divide el referido sinclinal...en las perforaciones en búsqueda de petróleo, por la Compañía Shell, en el flanco Sur del anticlinal del Ariguanabo, no se encontró el agua a profundidad, y solo apareció en el manto freático superior correspondiente a la zona de alteración superficial o zona de meteorización”*.

Estas opiniones fueron rebatidas en su momento por Montouliou (1940) y Fernández Simón (1940) pero apoyadas por Morales (1940). El primero de ellos hace referencia a su estudio de 1912 *“Teoría del origen de los manantiales de Vento a Calabazar”*, donde señalaba que en Agua del Cura se encuentra *“el centro de concentración de grandes grietas sinclinales en el fondo del valle Ariguanabo de Oeste a Este, por cuyas amplias diaclasas correría de Oeste a Este en la profundidad del Thalweg, el grueso de las concentraciones subterráneas que allí se acumulaban desde las altiplanicies desde Cayajabos hasta Vento-Calabazar...y por tanto ratifico que hay dos cuencas, que yo nombré en mi trabajo citado en 1912, la Cuenca Oriental del Almendares , que es la que ...Brödermann llama la cuenca de Vento...y la otra Cuenca, la Occidental o del Ariguanabo, que es la que retiene su caudal regularizado en su rendimiento, que da origen a los manantiales de Vento, Aguada del Cura y parte de los manantiales del Calabazar (margen izquierda del río Almendares, de Vento a Calabazar)”*.

Fernández Simón comienza señalando categóricamente que *“las obras de captación en Aguada del Cura...se encuentran enclavadas precisamente en las formaciones...de la cuenca Ariguanabo no en las de la Cuenca Almendares...aseveración plenamente confirmada por los estudios altimétricos del manto acuífero entre la Laguna de Ariguanabo y la Taza de Aguada del Cura llevados a cabo por el que suscribe durante los años de 1926 a 1930...”* (Véanse figs19-21). Vrba (1967) y Yankov (1974) compartieron estos criterios.

Morales (1940) señala, aún más categóricamente que Brödermann, que *“la cuenca de la laguna de Ariguanabo no almacena agua...y...Ariguanabo no resulta utilizable como fuente de abasto”*.

Albear (1974) escribe: *“...en condiciones naturales adecuadas y normales, las aguas subterráneas debieron rebosar de la Laguna de Ariguanabo hacia Vento y*



superficialmente, de la Laguna hacia el Sur a través de la garganta del cauce del río Ariguanabo o San Antonio...cualquiera que haya sido la interrelación en el pasado, actualmente ambas cuencas funcionan y se comportan como cuencas separadas”. En su opinión “no existe un límite verdaderamente bien definido entre las dos Cuencas de Vento y Ariguanabo en la zona llana comprendida entre Rincón y Murga y que en determinados momentos son posibles aportes de Ariguanabo hacia Vento”.

Pero el problema es aún más complejo. Durante el estiaje y las grandes sequías, como las de los años 1929, 1954-56, 1959-1963¹⁵, la cota +54 constituye un límite móvil entre Rincón y Loma Negrín a partir del cual las aguas corren hacia Ariguanabo o hacia Vento, separando el sistema de flujo (subcuenca la llama Albear) de Aguada del Cura de Ariguanabo. Concluye que “las dos cuencas pueden estar unidas subterráneamente o permanecer separadas al disminuir la carga hidrostática en la zona próxima a la divisoria” dependiendo de las lluvias y, añadimos, de la explotación del acuífero.

Ya hace casi 60 años, Vrba (1967) notó un descenso sistemático que alcanzaba entre 3,5 y 4 m de Este a Oeste en Vento y de 2,5 m de Norte a Sur, notable en los pozos de bombeo de Cuatro Caminos, Paso Seco, el Calvario y Meireles. Hasta casi 8 metros en este punto. Evidencias específicas son la desaparición de las Matamoros, el Humedal de Marco Ramírez, las lagunas de Cuatro Caminos y los de La Chorrera de Managua, que hoy son historia. Vrba y sus colaboradores reportaron hasta 10 metros de descenso residual de los niveles de agua subterránea en el Acueducto de Cuatro Caminos.

Algunas formas de conducción en Ariguanabo están activas (Yraola et al.: 2023; figs. 22-25) y pueden dar una idea de las direcciones fundamentales de la anisotropía (Fig. 26) al igual que las alineadas según el cauce subterráneo del río San Antonio (Rudovol: 1973).

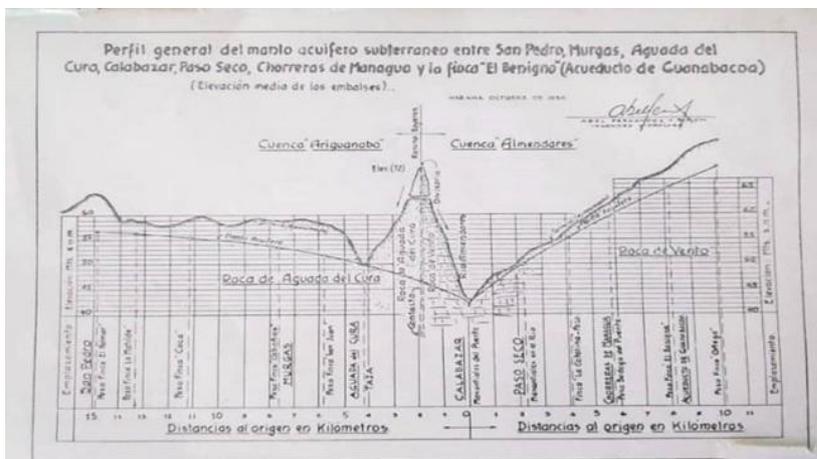


Fig. 19: Relaciones altimétricas de la superficie piezométrica entre Vento y Aguada del Cura (según Fernández Simón en 1940 y 1950),

¹⁵ El autor tuvo oportunidad de ver gran parte de la Laguna seca en 1962, aflorando las cercas de piedra que limitaban antiguas fincas



Fig. 20: Plano hidrológico general de Vento-Ariganabo (según Fernández Simón en 1950)



Fig. 21: Relaciones hidráulicas Ariguanabo-Vento Almendares y cuencas Sur (Según Fernández Simón en 1951)

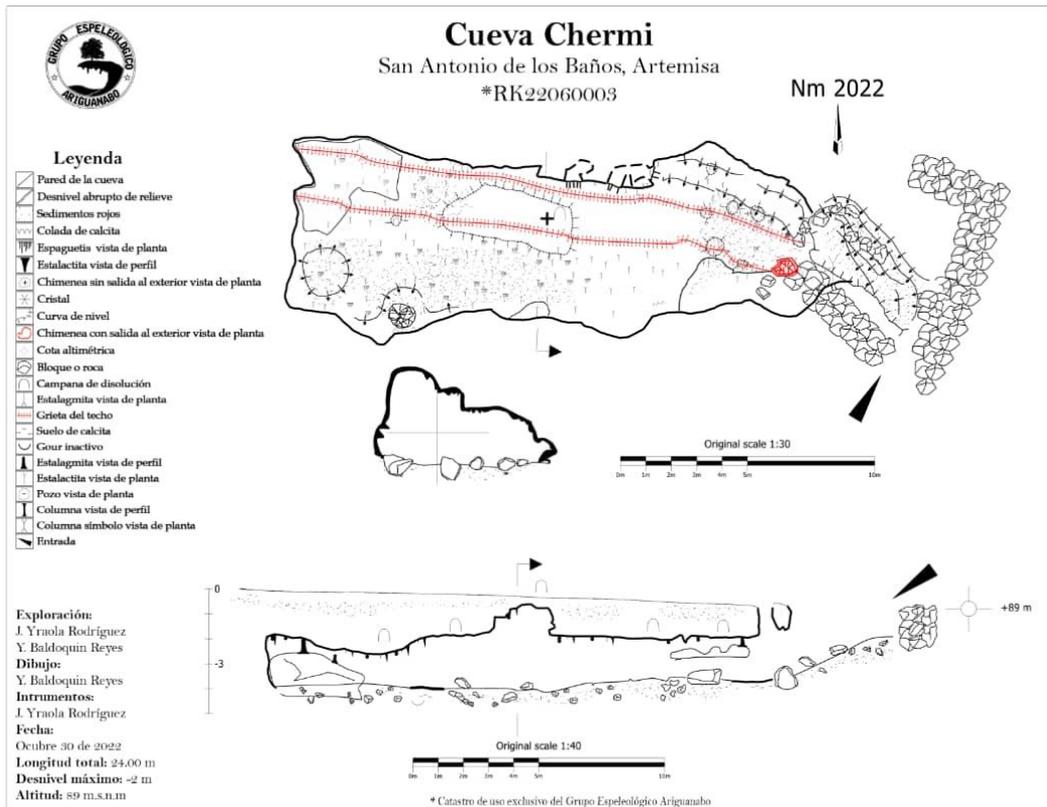


Fig. 22: Levantamiento topográfico de la Cueva Chermi (Yraola et al.: 2023)

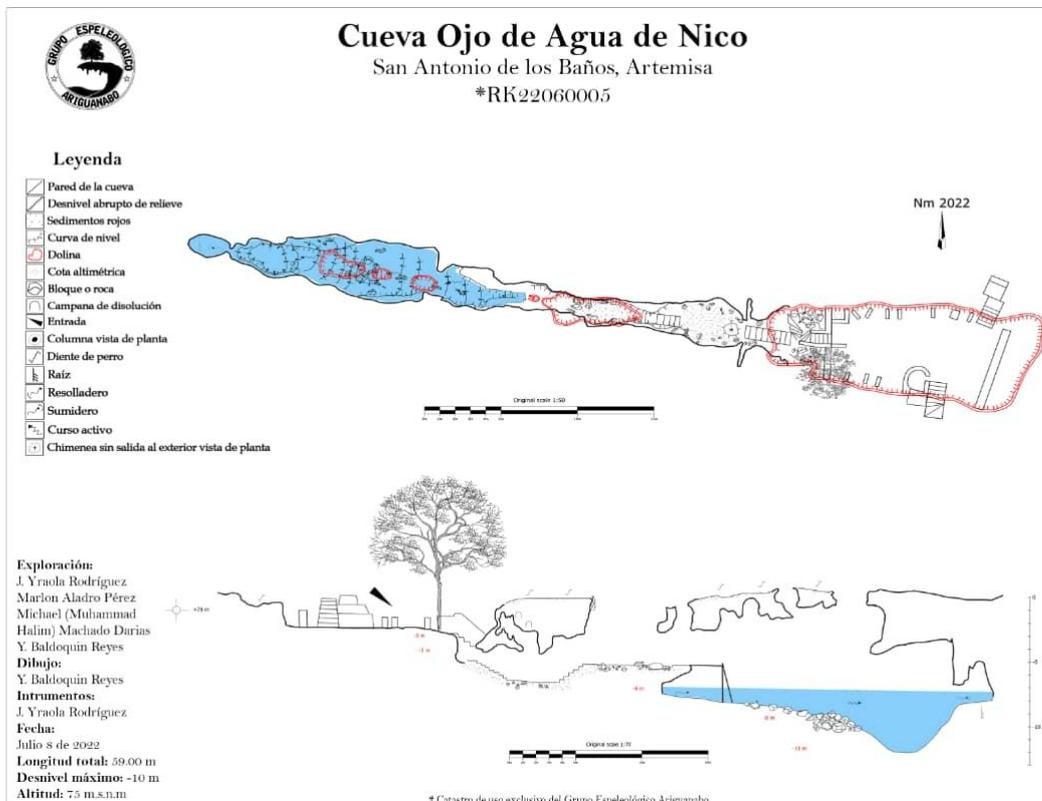


Fig. 23: Levantamiento topográfico de la Cueva de Ojo de Agua de Nico (Yraola et al.: 2023)

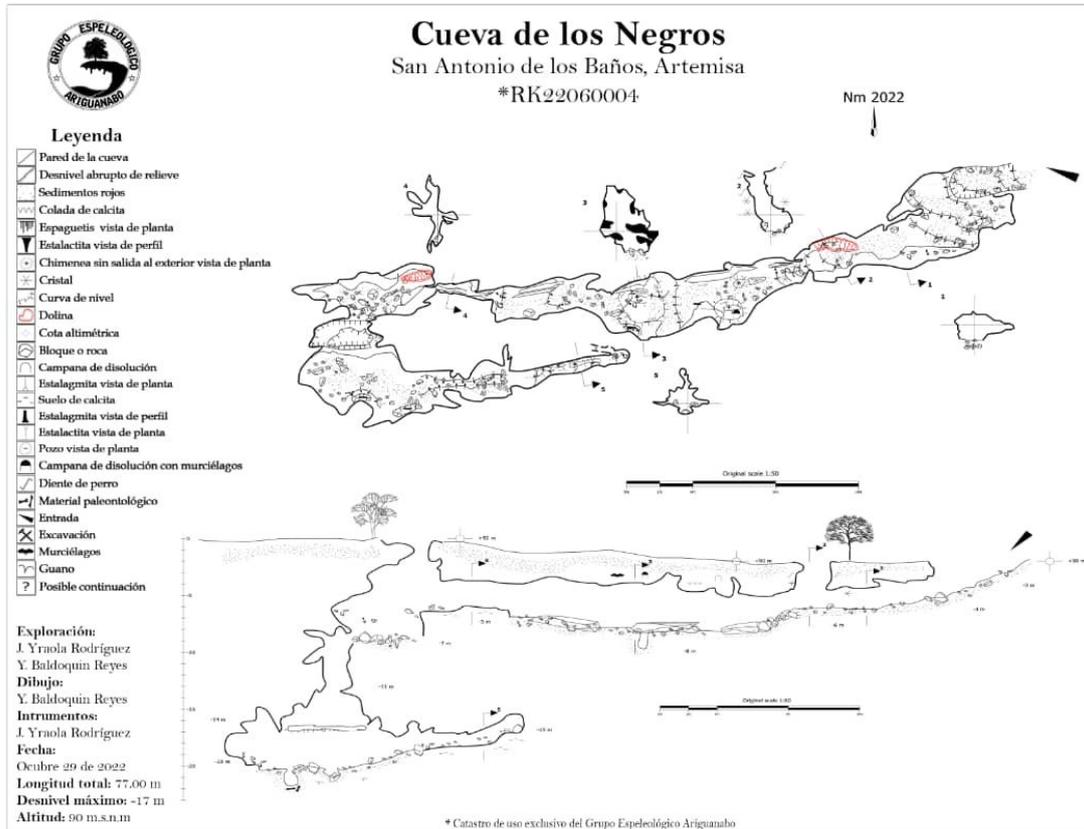


Fig. 24: Levantamiento topográfico de la Cueva de Los Negros (Yraola et al.: 2023)

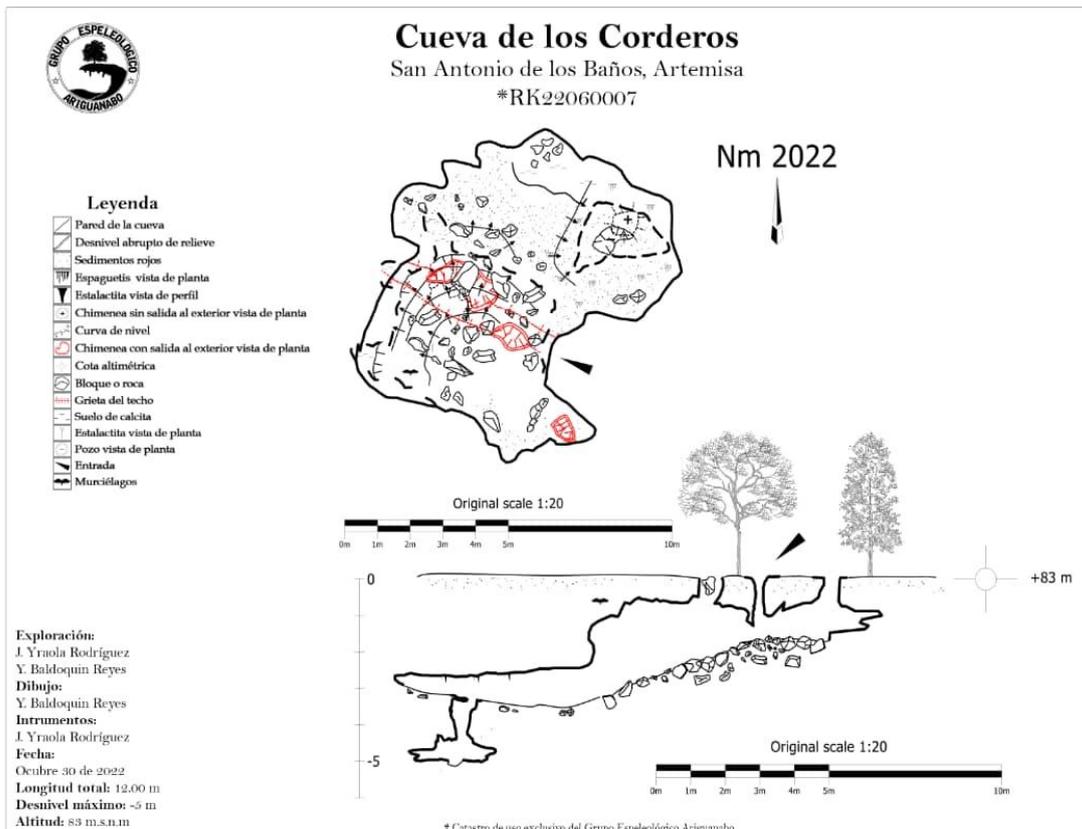


Fig. 25: Levantamiento topográfico de la Cueva de Los Corderos (Yraola et al.: 2023)

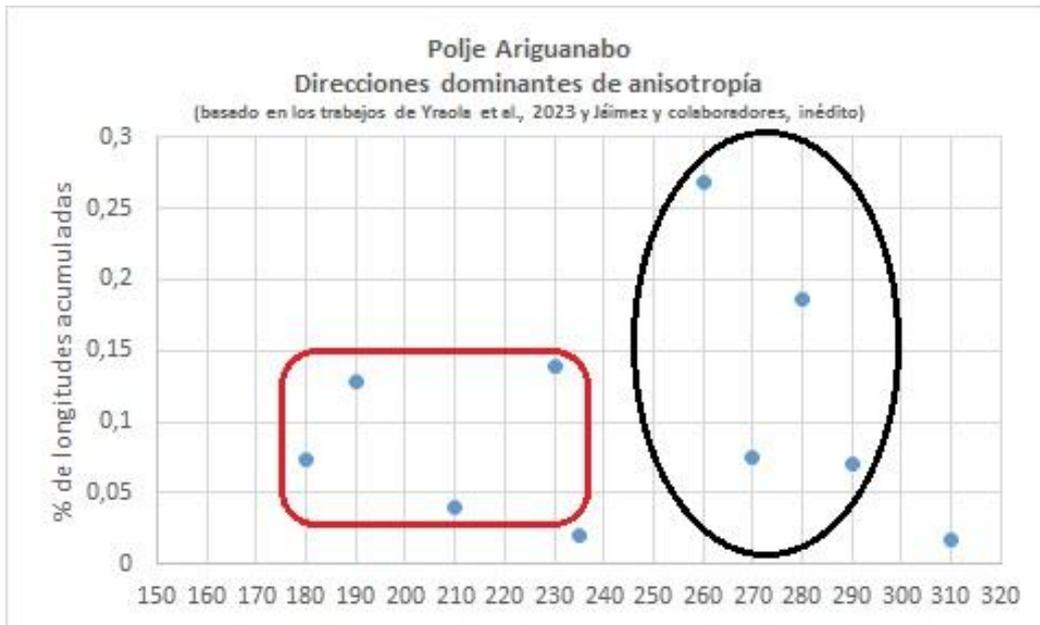


Fig. 26: Direcciones dominantes de anisotropía en el acuífero Ariguanabo (zona de San Antonio de los Baños) basadas en las direcciones dominantes y longitudes acumuladas de cuevas directas (Fuente de los levantamientos topográficos: Yraola et al., 2023 y Jáimez y colaboradores, inédito).

Respecto a la conexión Ariguanabo – Vento, la opinión de Magaz y Portela (2016) es importante: “La disminución del caudal tributario a la laguna sería el resultado de una captura fluvial e incorporación a la vertiente Norte de la cuenca alta y media del río Almendares por parte del cauce remontante y acañonado de La Chorrera que desemboca en la capital.... perforaciones realizadas en el extremo NE de la laguna original, cerca del Aeropuerto José Martí, y del codo de ángulo casi recto que hace el río Almendares en la zona de Río Verde y Calabazar, hallaron un cauce enterrado cuyos cantos rodados tienen la misma composición e igual grado de rodamiento que los existentes en las terrazas y el cauce de la parte alta del Almendares”.

El acuífero de Vento, subterráneamente, también descarga hacia Jaruco, al suroeste de Catalina de Güines, pero que, en las Escaleras de Jaruco, en su extremo noroeste, presenta una notablemente compleja zona de absorción (dominada por simas verticales) y descarga lateral a diferentes niveles (fig. 27; Molerio: 2020). Esta zona reduce en unos 1150 lps el caudal supuestamente drenado hacia Vento que es descargado al norte y al suroeste y que, tradicionalmente, se ha considerado parte de este acuífero.



Fig. 27: Difiuencias y conexiones subterráneas en las Escaleras de Jaruco (Molerio: 2020)

El caso de Jaruco-Aguacate (fig. 28) también es sumamente complejo (Molerio et al.: 1993; 2002). Es, con unos 17 km en línea recta, una de las conexiones subterráneas más largas identificadas en Cuba (Molerio, Vento y Sardiñas: 2024.) que sistemáticamente amenaza la calidad de las aguas de los Manantiales Bello, una de las fuentes de abastecimiento a la Ciudad de Matanzas, por lo que constituye un foco de atención de aguas compartidas entre dos provincias en las que se procede cuidadosamente respecto a su explotación. Otra razón no menos importante es que se ha comprobado que en estiaje, los manantiales Bello drenan aguas con más de 100 años de tiempo de residencia que interactúan con las anteriores en un grado de mezcla todavía inexacto.

En 1986, el Esquema Regional Precisado... (INRH: 1986; Barinaga: 2023) se señala que “*así, en el caso cuando no existe el límite superficial entre las cuencas Jaruco y Aguacate, se observa claramente en los mapas de hidroisohipsas la presencia del límite subterráneo, y por el contrario, cuando está definido el límite del escurrimiento superficial, entre las depresiones Ariguanaboy Almendares, las aguas subterráneas de éstas forman un flujo único hacia el cauce del río Almendares...*” Para esa fecha, ya esos autores estaban al tanto de la problemática de las conexiones entre algunos de estos sistemas acuíferos y los problemas que ocasionaban a la evaluación y gestión de los recursos hidráulicos.

Problemas de la gestión de los recursos hidráulicos

El balance hídrico de los sistemas acuíferos Ariguanabo, Vento, Jaruco y Aguacate hoy, es deficitario sin dudas, y ello se debe a varias causas que comentaremos.

La más trascendente, en nuestra opinión, es el uso de un modelo conceptual inexacto e impreciso sobre la hidrología e hidrogeología local y, en consecuencia,



sesgado respecto a dónde, cuándo y bajo qué régimen se extraen las aguas subterráneas. De ahí se han derivado métodos de cálculo que, por lo tanto, no son los suficientemente precisos y todo un arreglo de sistemas de monitoreo y generalización de la información hidrodinámica y de calidad de las aguas que presenta no pocos puntos ambiguos.

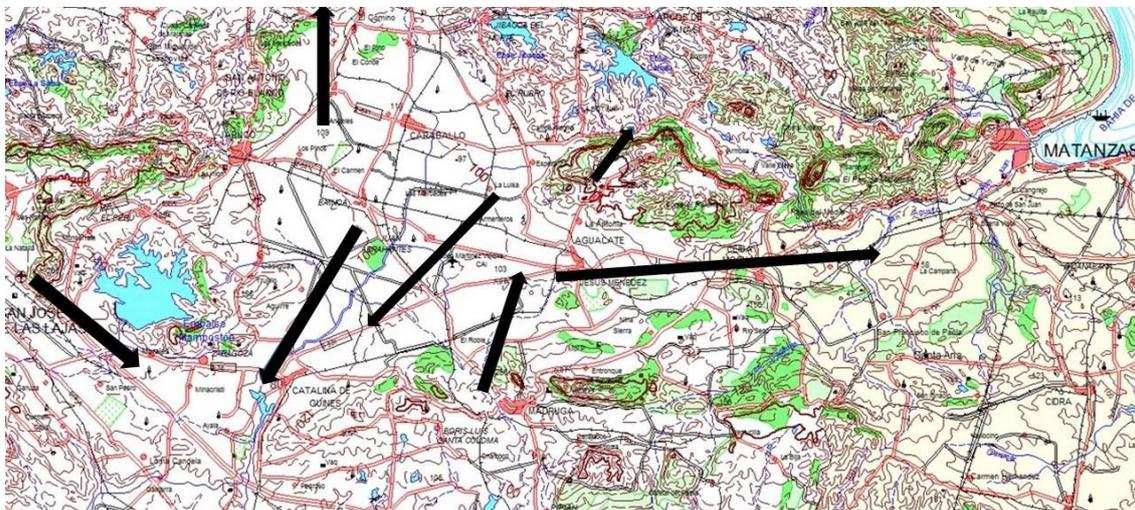


Fig. 28: Conexiones superficiales y subterráneas del sistema Jaruco – Aguacate marcadas con saetas en la dirección dominante de flujo

El más común, considerar el funcionamiento de estos acuíferos como un embalse, establecer la descarga natural en un gráfico semejante al de despacho de un embalse con sus salidas perfectamente marcadas por las fluctuaciones de carga en puntos índice puede conducir a notables errores; entre otras razones, como ya hemos señalado, porque dan por sentado que la heterogeneidad ni la anisotropía ejercen influencia alguna sobre la estructura del campo de propiedades físicas.

La primera consecuencia nefasta para los decisores es que, de la manera tradicional, se contabiliza más agua disponible que la que realmente se tiene. Esa es una de las causas de la eventual ineficiencia de los sistemas de abastecimiento de agua. Como señala Kitanidis (1997, 2015) el alto grado de variabilidad espacial de la conductividad hidráulica y lo complejo que resultan las causas de esa variabilidad son la principal fuente de incertidumbre de los procesos de flujo y transporte de masa. La adopción de un continuo equivalente no siempre resuelve estos problemas y, muchas veces, los complica (Cooley: 2004).

Otra restricción es el incorrecto modo en que se maneja la recarga natural de los sistemas acuíferos, no ahora, sino al menos desde principios del siglo pasado, en que se comenzaron a sellar los sumideros y dolinas para la construcción de obras importantes, como el hoy aeropuerto Internacional José Martí alrededor de 1927, de grandes sistemas

de bombeo como el Acueducto de El Gato en los años 1980 y sistemas viales y urbanos que cortaron parte de los flujos superficiales y distorsionaron las líneas de flujo entre Ariguanabo y Vento.

Se puede añadir, la deficiente y casi inexistente regionalización hidrogeológica interna y los recursos de los diferentes sistemas acuíferos y unidades hidrogeológicas en el territorio; asociado a ello, la posición de los parteaguas superficiales y subterráneos, móviles; esto es, estacionales, según la distribución de la recarga y la descarga natural y artificial, fenómeno particularmente notable en el sector Jaruco-Aguacate y sobre el que S. Guneva insistió desde 1967. O el singular comportamiento hidrodinámico de Agua del Cura o el sistema de Meireles que parecen constituir sistemas independientes entre sí y del acuífero Vento.

La magnitud y la variabilidad temporal de las relaciones hidráulicas entre Ariguanabo-Vento y Ariguanabo-Cuenca Sur (esta última bien caracterizada por ensayos con trazadores naturales y artificiales desde 1967 y por exploraciones directas desde 1973) está lejos de conocerse con precisión. Existen pozos de bombeo que se consideran en la Cuenca de Vento que, hidrogeológicamente pertenecen al acuífero de Ariguanabo (citado por Barinaga: 2023).

El sostenido déficit de precipitaciones y el incremento de las extracciones (a esto se le pueden sumar las pérdidas por almacenamiento y conducción que incrementan el bombeo y las extracciones), cosas ambas nada despreciables pero que afecta el concepto básico de la filosofía actual de trabajo que no gestiona la demanda, sino que vuelve al acuífero una y otra vez para cargarlo de la ineficiencia del sistema de abasto. La política social del Estado de satisfacer la demanda de manera prioritaria ha llevado también a establecer sistemas de conexiones desde fuentes de abasto, antes independientes, que establecen nuevas relaciones hidráulicas, dejando atrás límites entre entidades hidroeconómicas e introduciendo otros nuevos bajo un esquema de aguas compartidas sin precedentes en cuanto a su extensión geográfica. Para Vento, por ejemplo, Méndezha estudiado este asunto cuidadosamente (Méndez et al.: 2018, 2022; Sánchez, Méndez y Hernández: 2018; Méndez: 2023).

En estos poljes cársicos no son despreciables muchas de las incertidumbres que limitan la gestión adecuada de los recursos hídricos subterráneos en el karst y que hemos tratado recientemente (Molerio y Sardiñas: 2024); esto es: a) el modelo conceptual del sistema acuífero; b) la calidad de la data base; c) los métodos de cálculo y d) el modelo de gestión. Algunos han sido mencionados más arriba.

El modelo conceptual ha sido tratado con cierto detalle en este y otros trabajos (véase bibliografía) y el problema con la data base se inclina más hacia las técnicas de procesamiento y generalización que a las de obtención y almacenamiento del dato base; sin embargo, no deja de ser complicado el modo en que se manejan las incertidumbres relacionadas con la homogeneidad estadística de las series, las correlaciones espaciales y temporales, las condiciones de borde de los sistemas acuíferos, el dato faltante, la representatividad de los puntos de muestreo, así como el modo en que se generalizan los datos de los ensayos de caudal y la influencia del factor de escala en la interpretación de la estructura del campo de propiedades físicas del acuífero en cuestión (Molerio: 1984).

El modelo de gestión tiene que cambiar definitivamente. Las deficiencias en el sistema de abastecimiento a todos los sectores (doméstico, industrial, tecnológico, turístico, recreativo, etc.) no puede recaer en el acuífero sino en su propia corrección ingeniera, tecnológica y administrativa. Las pérdidas en el sistema de conducción por problemas técnicos, fugas, captaciones clandestinas, derroche, mal planeamiento, dotaciones sobrecalculadas y otras más, no pueden resolverse extrayendo más aguas de las fuentes de abasto, ni profundizando los pozos, ni construyendo reservorios artificiales o nuevas captaciones. La gestión de la demanda tiene que dominar el uso de los recursos hídricos. Se requiere de una política muy bien definida, pero sumamente compleja de implementar, que debe considerar soluciones tecnológicas y beneficios económicos aún lejos de alcanzarse a plenitud y que van desde el metrado hasta el pago de un precio justo por el servicio de acueducto por la frecuencia, cantidad y calidad del agua y asignaciones que impliquen cambios de regímenes de explotación y redistribución de la calidad adecuada del agua por tipo de usuarios.

Esas ideas fueron resumidas y presentadas al PRIMER SEMINARIO LATINOAMERICANO DE GEOGRAFÍA FÍSICA, celebrado en la Habana entre agosto 1 y el 5 del año 2000 (Molerio: 2000b). Se impone ahora, aún más que hace un cuarto de siglo, la necesidad de trabajar sobre la demanda para garantizar la sostenibilidad de los recursos de aguas terrestres y, particularmente, los subterráneos. Señalábamos en aquella oportunidad que hasta el momento, las políticas de gestión de los recursos hídricos se han concentrado en el desarrollo y aprovechamiento para satisfacer las necesidades siempre crecientes de agua o de bienes y servicios relacionados con el agua o en la mitigación o reducción de desastres naturales como las sequías e inundaciones. Por ello, ha predominado un enfoque fundamentalmente

ingeniero para la solución de los problemas de gestión de los recursos hídricos y no ha existido un equilibrio entre los modelos de desarrollo económico, protección del medio ambiente y explotación de los recursos hídricos.

Los poljes se inundan y continuarán haciéndolo pues esos fenómenos son parte del funcionamiento hidrológico natural de los poljes. Las inundaciones serán más o menos graves en dependencia de cuánto se hayan modificado los relieves naturales sin tomar en consideración este fenómeno en el karst, como ocurrió durante el Huracán Frederick, en 1979 (Hernández: 2022). La reducción de las áreas de recarga natural en todos estos sistemas acuíferos conspira contra la gestión de estos eventos extremos.

El modelo dominante de aprovechamiento de la tierra y el agua en Cuba (y en América Latina en general), se ha caracterizado por la introducción de modelos tecnológicos exógenos que incrementan el deterioro ambiental, económico y socio-cultural de las comunidades, la transferencia de paquetes tecnológicos o conjuntos de técnicas que no pueden ser eficientes si se les usa separadamente, que se incorporan como insumos cada vez más caros respecto a los productos, la ejecución de proyectos como respuesta sectorial a problemas globales, la construcción de obras exageradamente grandes, el uso ineficiente de las obras hidráulicas, la desproporción entre los recursos para la ejecución de las obras respecto a la capacitación, organización y desarrollo de las comunidades y la exclusión de los usuarios en el manejo de las obras y la gestión ecohidrológica. Señalábamos entonces que esta centuria debía estar dominada por la gestión de la demanda con preferencia a la gestión ingeniera, a fin de garantizar la sustentabilidad en el desarrollo, la integración sectorial, los arreglos institucionales, el desarrollo de capacidades y la participación pública y privada en el aprovechamiento de los recursos hídricos.

El Modelo de **Gestión de la Demanda** resulta una aproximación sustentable al aprovechamiento de los recursos hídricos. Más allá de Cuba, tres aspectos fundamentales integran el modelo: a) las restricciones en las pequeñas islas, b) la escasez de agua en zonas áridas y semiáridas y c) el incremento en la competencia de recursos hídricos compartidos que es crítica en áreas urbanas como La Habana, capital del país, sometida a muy fuertes presiones para el abasto de agua (Molerio, González y Planos: 2015).

De manera que se enfrenta un modelo de gestión, tanto en las zonas rurales como en las ciudades, que requiere de un cambio sustancial de concepción, de estrategia y de acciones para gestionar la demanda de agua, habida cuenta que se enfrentan dos

tipos: a) la **Demanda Social de Regulación**, que es aquella necesaria para satisfacer los requerimientos de las comunidades y b) la **Demanda Hídrica Natural**, que es aquella orientada a satisfacer las necesidades de los ecosistemas naturales.

Nota final

La reconceptualización hidrogeológica de los sistemas acuíferos Ariguanabo, Vento, Jaruco-Aguacate-M-1 debe redundar en una mejora sustancial de la gestión ordenada de sus recursos hídricos al introducir, como consecuencias, una nueva visión, metodologías de investigación y procesamiento adecuados y mayor precisión en la distribución de su potencial acuífero, su distribución espacial y el modo en que varían temporalmente. Ello se extiende, consecuentemente, a un mejor y más razonable uso del suelo y la mejora de la calidad de las aguas.

En Vento, Jaruco y Aguacate se ha comprobado el predominio de aguas muy lenta renovación natural en determinadas épocas del año. Tanto en los puntos de descarga natural como en pozos de observación y de bombeo (Molerio et al.: 1993; 2002). Aparte de indicar el desarrollo de sistemas de flujo con cierta independencia son un indicativo de un potencial (o real) minado del acuífero y el avance sistemático a la sobreexplotación del sistema. La recarga natural no suple ese déficit desde hace prácticamente décadas (ya ocurría cuando por primera vez detectamos el problema a principios de los años 1990) y no se ha recuperado aún. Esta característica no se ha incorporado todavía a la gestión de las aguas subterráneas y debe ser considerado adecuadamente para garantizar la disponibilidad y recuperación del acuífero y, nunca mejor dicho, la sostenibilidad de la gestión del recurso. En Ariguanabo no se han llevado a cabo esos estudios con técnicas de trazadores nucleares, pero, por la estructura geológica y el modo en que se organiza el escurrimiento subterráneo puede presumirse que fenómenos semejantes tengan lugar.

El ajuste del modelo conceptual trae como consecuencia una descripción física y matemática más completa y precisa de los procesos de transporte de masa en los dominios de flujo involucrados, una optimización de los sistemas de monitoreo hidrológico –bajo la concepción de que las aguas superficiales y subterráneas en el karst son un solo y único recurso–, el imprescindible mejoramiento de los métodos de cálculo y el ordenamiento del régimen de explotación y protección de los recursos hídricos y la comprensión del origen de las amenazas hidrológicas y el diseño del mejor modo de adaptación y mitigación para la adecuada protección de la población y los bienes.



El conocimiento integral del karst cubano es imprescindible para manejar los recursos hídricos del país y todo su sistema soporte.

El karst constituye el medio acuífero más importante de Cuba y como espacio geográfico, domina el territorio nacional (*fig. 29*). Es un geosistema particular y según nuestra más reciente evaluación¹⁶, se extiende sobre una superficie aproximada de – hasta ahora- 72 630 kilómetros cuadrados, un poco más del 66% del área total del país, de los cuales 64 587 km² corresponden a tierra firme (10 882 a las zonas montañosas y 61 748 llanuras). Se incluyen 2 839 km² de sistemas o aparatos sin regionalizar hidrogeológicamente que corresponden, 1 336 km² al karst de los cayos e isletas del archipiélago y el resto (1 503) a zonas de elevaciones.

En los territorios de karst de llanuras, se concentran numerosos núcleos poblacionales urbanos y rurales, industrias, centros educacionales, y de turismo y recreación, instalaciones agrícolas y ganaderas, y otros que, en mayor o menor grado, requieren del empleo racional y suministro de agua potable cualitativa y cuantitativamente correspondientes con sus necesidades actuales y perspectivas. El 42% de la población cubana se abastece de fuentes de agua en el karst. De estas llanuras cársicas acuíferas, la mayor parte forman karsts litorales, permanentemente amenazadas por el avance, tierra adentro, de la intrusión marina.

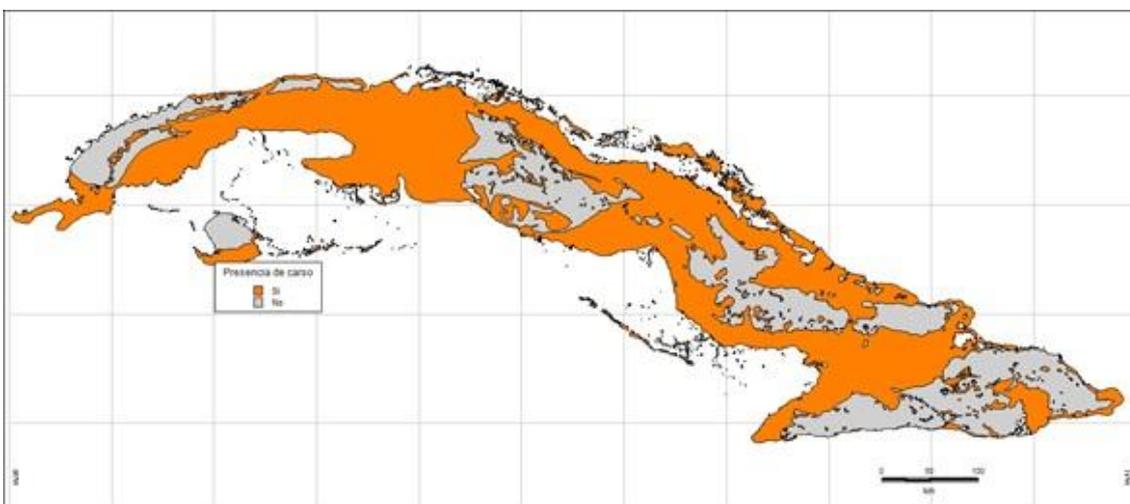


Fig. 29: Esquema general de distribución de las áreas cársicas de Cuba (basado en la distribución geográfica de las rocas carsificables, básicamente carbonatadas, según el Atlas Nacional de Cuba (Cuba, 1989). Debe notarse que todas las áreas mapeadas de rocas carbonatadas no han sido evaluadas según el nomenclador de regionalización hidrogeológica descrito en Molerio (2023).

¹⁶ Que mejora la establecida en Molerio (1974), en cuya oportunidad nuestros compañeros Rafael Feitoo y Ramón Sardiñas, bajo la supervisión de Juan Bobes Consuegra asumieron la planimetría de los espacios regionalizados. Núñez, Panos y Stelcl (1969) dan un área mayor: “tres quintas partes de terrenos calcáreos, principalmente de rocas carsificadas de varias clases y edades”

De los 6,3 km³ de recursos de agua subterráneas de que dispone el país, casi el 80 % se encuentra en estos territorios donde se distribuye el 95% de las cuencas hidrogeológicas cubanas. Por su relación con los ecosistemas que crea, sostiene o interactúa, es transversal a la mayor parte de la sociedad, la economía y el medio ambiente. También en él se encuentran yacimientos de petróleo, importantes minerales útiles, la mayor parte de los suelos agrícolas del país y prácticamente las cuatro quintas partes de la población del país se sirve o aprovecha sus recursos naturales.

La Habana, mayo 25, 2024

Bibliografía

- ACEVEDO GONZÁLEZ, M. (1971): “Contribución al estudio de la evolución geomorfológica de la Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba”. *Tecnológica*, VIII (2), Marzo-Abril, pp. 16-34
- ALBEAR, JESUS FRANCICO (1974): “Ensayo sobre los factores que intervienen en el régimen de las aguas subterráneas y observaciones sobre algunas del Occidente de Cuba”. Simp. XXX Aniversario Soc. Espeleológica de Cuba, Serie Espeleológica y Carsológica 47, Acad. Cienc. Cuba., Inst. Geo. La Habana, pp. 117.
- ALBEAR, J.F.DE, ITURRALDE-VINENT (1977): Mapa tectónico de La Habana escala 1: 250 000. En: De Albear, J.F., e Iturralde-Vinent, M., 1977. Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana. Resultados de las investigaciones científicas y del levantamiento geológico escala 1: 250 000. Instituto de Geología y Paleontología de la Academia de Ciencias de Cuba. Oficina Nacional de Recursos Minerales del Ministerio de Energía y Minas, La Habana (inédito).
- ALBEAR, J.F.DE, ITURRALDE-VINENT (1977): Mapa geológico de La Habana escala 1: 250 000. En: Albear, J.F., e Iturralde-Vinent, M., 1977. Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana. Resultados de las investigaciones científicas y del levantamiento geológico escala 1: 250 000. Instituto de Geología y Paleontología de la Academia de Ciencias de Cuba. Oficina Nacional de Recursos Minerales del Ministerio de Energía y Minas, La Habana (inédito).
- ALBEAR, J.F.DE, ITURRALDE-VINENT (1985): “Zonación estructuro-facial de las provincias de la Habana”, *Contribución a la Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de la Habana*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, pp. 68-76.
- ALBEAR, J.F.DE, ITURRALDE-VINENT (1985): “Pisos estructurales en el territorio de las provincias de la Habana”, *Contribución a la Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de la Habana*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, pp. 77-86.
- ALBEAR, J.F.DE, M. ITURRALDE-VINENT, G.FURRAZOLA-BERMÚDEZ, J.R.SÁNCHEZ-ARANGO (1985): *Contribución a la geología de las provincias de La Habana y Ciudad de la Habana*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, pp. 155.
- BARINAGA QUEVEDO, LUIS A. (2023): “El gran dilema: Vento Ariguanabo. El límite de sus aguas subterráneas”, *INRH*, Archivo Grupo de cuencas de la Capital, La Habana, pp. 33.
- BEILIN, V. (1984): Informe para la argumentación hidrogeológica del proyecto de medidas contra inundaciones del Aeropuerto José Martí y de la Textilera Ariguanabo. Archivo CENHICA.
- BONACCI, O. (2013): “Poljes, Ponders and Their Catchments”, en John F. Shroder (Editor-in-chief), Frumkin, A. (Volume Editor). *Treatise on Geomorphology*, Vol 6, Karst Geomorphology, San Diego: Academic Press, 2013. pp. 112-120.

- BRÖDERMAN, J. (1940): "Determinación geológica de la Cuenca Vento". *Rev. Soc. Cubana de Ingenieros*, 34 (2), pp. 272-315.
- BRÖDERMAN, J. (1943): "Breve reseña geológica (de Cuba)", *Censo de la República de Cuba*, pp.113-148.
- BRÖDERMAN, J. (1945): "Breve reseña geológica de la Isla de Cuba. Quinto Congreso Nacional de Ingeniería", *Rev. Soc. Cubana de Ingenieros*, 42 (1), pp. 110-149.
- BRÖNNIMANN, P., D. RIGASSI (1963): "Contribution to the geology and paleontology of the area of the city of La Habana, Cuba, and its surroundings", *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 56, pp.193-480.
- ĆALIĆ, JELENA(2011): "Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term" *Geomorphology* 134, pp 32-42.
- COOLEY, RICHARD L. (2004): "A theory for modeling ground water flow in heterogeneous media". United States Geol. Survey. Prof. Paper 1679, Reston, Virginia, pp. 220.
- CUBA, ACADEMIA DE CIENCIAS (1989): Nuevo Atlas Nacional de Cuba, Academia de Ciencias de Cuba, Editado por el Instituto de Geografía y el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, La Habana.
- CVIJIC, J. (1893), "Das Karstphänomen: Versucheiner morphologischen", *Monographie Geographische Abhandlungen* 5(3), (ed. by A. Penck), Vienna: Hölzel, pp. 113.
- CVIJIC, J. (1895), *Karst Geografska monografija*. Belgrade: Štamaparija Kraljevine Srbije, pp. 176.
- CVIJIC, J. (1918) , *Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst*, Recueil des Travaux de L'Institut Géographie Alpine (Grenoble), 6(4).
- CVIJIC, J. (1924), "The Evolution of Lapias: A Study in Karst Physiography". *Geographical Review*, 14(1), pp. 26-49.
- DAVIS, WILLIAM MORRIS (1909): *Geographical Essays*. Ginn & Co., 777
- EGOROV, S.V., Y J.R. LUEGE (1967): *Hidrogeología de Cuba*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos e Instituto Cubano de Recursos Minerales, La Habana, 84.
- FERNÁNDEZ, ABEL (1940), "Comentario al trabajo del Ing. J. Brodermann", *Revista de la Sociedad Cubana de Ingenieros*, 34 (2), pp., 319-322.
- FORD, D.C. AND WILLIAMS, P.W. (1989), *Karst Geomorphology and Hydrology*, London: Chapman and Hall.
- FRANCO, GUILLERMO L., RAISA DELGADO DAMAS (1997), "El Sistema Neógeno", En Furrázola-Bermúdez, G., y Núñez-Cambra, K., 1997, *Estudios de Geología de Cuba*, Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, pp.,141-178.
- FRELIH, MARTINA (2003): "Geomorphology of karst depressions: polje or uvala - a case study of Luèkidol". *Acta carsologica*, 9(32/ 2), pp.,105-119.
- GAMS, I. (1978), "The polje: the problem of definition". *Zeitschriftfür Geomorphologie* 22, pp., 170-181.
- GUTIÉRREZ DOMECH, ROBERTO, MANUEL RIVERO GLEAN(1997), *Mini Geografía de Cuba*. Inst Cubano del Libro. Edit Científico Técnica, La Habana, pp.,142.
- GUTIÉRREZ DOMECH, ROBERTO, MANUEL RIVERO GLEAN(2002): *Cuban Nature*. Edit. José Martí, La Habana, pp.,223.

- HERAK, MILAN (1976), *The Yugoslav contribution to the knowledge of Karst Hydrology and Geomorphology*. Proc. U.S.-Yugoslavian Symp. Dubrovnik, 1975. [Ed. VujicaYevjevich]: Karst Hydrology and Water Resources. Water Resources Publ. Fort Collins, Vo..1, pp., 3-30.
- HERNÁNDEZ VALDÉS, ARMANDO O. (2022), “El aeropuerto José Martí y peligros asociados a su sistema de protección contra inundaciones”, *Ing. Hidráulica y Ambiental*, XLIII(2), pp.,71-83.
- IGP (2014), *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Instituto de Geología y Paleontología Servicio Geológico de Cuba, Ministerio de Energía y Minas Tercera Versión, La Habana, Cuba, pp.,458.
- INRH (1986), *Esquema Regional Precisado para el Aprovechamiento Integral de los Recursos Hidráulicos y Agrícolas de las Provincias de La Habana, Matanzas y Ciego de Ávila. Tomo VII: Hidrogeología*. Recursos de las Aguas Subterráneas, Archivo, Inst. Nac. Recursos Hidráulicos, La Habana, pp., 335.
- INRH (2000), Mapa Hidrogeológico de Cuba a escala 1:250 000. La Habana.
- ITURRALDE-VINENT, M. (1966), “La Cueva del Murciélago”, *Boletín del Grupo Espeleológico Martel de Cuba*, 10 pág., La Habana.
- ITURRALDE-VINENT, M. (1971), “Correlación estratigráfica del Neógeno de Cuba”, *Tecnológica*, 9 (1), pp., 15-19.
- ITURRALDE-VINENT, M. (1977), “Mapa hidrogeológico de La Habana escala 1: 250 000”, en: De Albear, J.F., e Iturralde-Vinent, M., 1977. *Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana. Resultados de las investigaciones científicas y del levantamiento geológico escala 1: 250 000*. Instituto de Geología y Paleontología de la Academia de Ciencias de Cuba. Oficina Nacional de Recursos Minerales del Ministerio de Energía y Minas, La Habana (inédito).
- ITURRALDE-VINENT, M. (1978), “Los movimientos tectónicos de la etapa de desarrollo platafórmico de Cuba”, *Geologie en Mijnbow*, 57 (2), pp., 205-212.
- ITURRALDE-VINENT, M. (2021), *Geología de Cuba*. Compendio 2021. Edit. CITMATEL.
- JÁIMEZ SALGADO, EFRÉN JOSÉ, MARIO GUERRA OLIVA, JESÚS ÁLVAREZ GONZÁLEZ (2023), “El Sumidero del Río Ariguanabo en San Antonio de los Baños, podría ser el kilómetro cero del sistema cavernario de mayor longitud lineal de Cuba”, *Gota a Gota*, G. E. Villacarrillo, 30, pp., 8-15.
- JAKUCS, LASZLO (1977), *Morphogenetics of karst regions. Variants of karst evolution*. Akad. Kiadó, Budapest, pp., 284.
- JENNINGS, J.N. (1971), *Karst: An introduction to systematic geomorphology*. MIT Press, Cambridge-Massach.-London, Australia, pp.,252.
- KITANIDIS, Peter K. (1997), “Groundwater flow in heterogeneous formations”, en Gedeon Dagan y Shlomo P. Neumann [Eds]: *Subsurface flow and transport. A stochastic approach*, pp., 83-91.
- KITANIDIS, PETER K. (2015), “Persistent questions of heterogeneity, uncertainty, and scale in subsurface flow and transport”, *Water Resources Res.* 51, B:5888-5904.
- LEAL RAMÍREZ, R.M., M. GUERRA, L. MOLERO (2003), “Vulnerabilidad a la contaminación en el tercio inferior de la cuenca del río San Antonio”, *V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Memorias Geomin 2003.*, La Habana, Marzo 24-28:TGMMA 64-TGMMA 72.
- LEHMANN, H. (1953), *Der tropische kegelkarst in Westindien*. Tagungsbe und wissens Abhand. Deutsch. Geographentag, Essen.
- LEHMANN, H. (1953), “Karst-Entwicklung in den Tröpen. Die Uns”, en *Wissenschaft und Technik*, Frankfurt, (18), pp., 32-45.

- LEHMANN, H. (1954), “Der tropische kegelkarst der verschiedenen Klimazonen”. *Erdkunde*, 8, pp., 130-139.
- LEHMANN, H. (1954), “Der Tropische Kegelkarst auf den Groben Antillen”, *Erdkunde*, 8, pp., 130-139.
- LEHMANN, H. (1960), “Las áreas Cársicas del Caribe”, *Revista de la Sociedad Geográfica de Cuba*, 30.
- LEHMANN, H. (1966), “La terminologie classique du karst sous l’aspect critique de la morphologie climatique moderne”, *Revue de Geographic de Lyon*, 35 (1), pp., 1-6.
- LEHMANN, H., K. KROMMELBEIN, W. LOTSCHERT(1956), “Karstmorphologische, geologische und botanisch estudios in der Sierra de los Órganos, auf Cuba”, *Erdkunde*, 10, pp., 185-204.
- MAGAZ GARCÍA, ANTONIO RAFAEL (2018), *Geomorfología de Cuba*. Edic. Privada, pp., 377.
- MAGAZ GARCÍA, ANTONIO R., ARMANDO H. PORTELA (2016), “Terrazas lacustres y formación de la Laguna de Ariguanabo”, *Cuba Geográfica* 1(2), pp., 1-5 .
- MARRERO, LEVÍ (1946), *Elementos de Geografía de Cuba*. Edit. Minerva, La Habana, 2da edición.
- MARRERO, LEVÍ (1951), *Geografía de Cuba*. Edit. Minerva, La Habana, 2da edición.
- MASSIP, J. Y S. ISALGUÉ (1942), *Introducción a la Geografía de Cuba*. Ed. Fiallo y Hnos., La Habana.
- MÉNDEZ VALDÉS, ODALYS, E, RIVERA, HAYDEE LLANUSA RUÍZ, A.HERNÁNDEZ (2018), “Enfrentamiento a la sequía operacional en la empresa Aguas de La Habana”, *Ing. Hidráulica y ambiental*, 39(2), pp., 112-123.
- MÉNDEZ VALDÉS, ODALYS, RAISA SOCORRO LLANES, HAYDEE LLANUSA RUÍZ, DANIELENRIQUE VALDÉS SALOMÓN (2022), “Evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca Vento aplicando minería de datos UNESP”, *Geociencias*, 41(4), pp., 975- 990.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1973), “Documentación de Campo del Exocarso”. 1ª Reunión Nacional de Normas y Metodologías para los Estudios Hidrogeológicos. Grupo Hidráulico Nacional, DAP, La Habana.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1975), “Esquema Geoespeleológico Preliminar de Cuba (Memoria Explicativa del Mapa de las Regiones Cársicas de Cuba a escala 1:1 000 000)”, *Simp. XXXV Aniv. Soc. Espel. Cuba*, La Habana,:68, en/Núñez Jiménez, A. (1990), *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II*, Imprenta Central de las FAR, La Habana.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1975), “Notas para una Tipología Geoespeleológica del Karst Cubano”. *Simp. XXXV Aniv. Soc. Espel. Cuba*, La Habana,:65 en/Núñez Jiménez, A. (1990), *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II*, Imprenta Central de las FAR, La Habana.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1975): “Aplicación del Método de Recesión al Estudio Hidrodinámico de las Fuentes del río Mayabeque”, *Simp. XXXV Aniv. Soc. Espel. Cuba*, La Habana,:67, en/Núñez Jiménez, A. (1990), *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II*, Imprenta Central de las FAR, La Habana.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1978): *Geología, Geomorfología e Hidrogeología Cársica del Valle del Río San Antonio o Ariguanabo*. Archivo, Inst. Hidroeconomía.
- MOLERIO LEÓN, L. F. (1980): *Tipología Hidrogeológica del Carso Cubano*. Inst. Hidroeconomía, La Habana.

- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. (1984): “El Efecto del Factor de Escala en la Interpretación del Campo Físico de las rocas carsificadas”, Resumen, *XXVII Internatl. Geol. Congr., Abril 4-14, 1984, Moscú*, Vol VII, Secc. 16, pp., 468-469. Véase, *Voluntad Hidráulica* 75, pp.,19-26.
- MOLERIO LEÓN, L.F. (2000), *Alcance y contenido del dictamen sobre la desobstrucción del sumidero del río Ariguanabo, San Antonio de los Baños, Habana*. Archivo, Inst. de Geofísica y Astronomía, CITMA, La Habana.
- MOLERIO LEÓN, L.F. (2000), *La Gestión de la Demanda de los Recursos Hídricos*. Primer Seminario Latinoamericano de Geografía Física, La Habana, agosto 1 y el 5.
- MOLERIO LEÓN, L.F. (2006), “Isotopic evidence of the overexploitation of karst aquifers”, en/ Demuth, S., A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, E. Servat (Eds.) (2006), *Climate Variability and Change: Hydrological Impacts*, IAHS Publ. 308, Publ. 308, Wallingford, pp., 629-634.
- MOLERIO LEÓN, L.F. (2007), *Tritium as an indicator of groundwater over exploitation in a tropical karst aquifer*. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water Resources Management, Vienna, Austria, 21-25 May, 2007. IAEA-CN-151/125.
- MOLERIO LEÓN, L.F. (2008), “Una Revisión del Uso de Tritio Cosmogénico en el fechado de aguas subterráneas y su aplicación en el Acuífero Kárstico de la Cuenca de Vento, Cuba”, *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 42, pp., 20-32.
- MOLERIO LEÓN, L.F. (2013), “Resumen de la Tipología Hidrogeológica del Karst Cubano”, *Aragonito*, nº 1, Suplemento del Periódico Digital Espeleológico El Explorador, Cuba, pp., 1-25.
- MOLERIO-LEÓN, L.F. (2020), “Los sistemas de drenaje de la parte oriental del karst de las Escaleras de Jaruco, Cuba”, *Gota a gota*, nº 20, pp., 91-97.
- MOLERIO-LEÓN, L.F. (2021), “El factor hidráulico en la identificación de “niveles de cavernamiento” en cuevas transfluentes: un tema no considerado”, *Cuadernos de Geomorfología de Cuba, Cuba Geográfica*, 2, Diciembre.
- MOLERIO-LEÓN, L.F. (2023), “Hidrogeología de las regiones cársicas de Cuba: Marco conceptual”, *Gota a gota*, nº 28, pp., 35-54.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F., J. A. DÍAZ MACHÍN, E. FLORES VALDÉS, M. GUERRA OLIVA (1980), *Observaciones Hidrogeológicas en el Curso Medio-Superior del río Govea*, Archivo, Instituto de Hidroeconomía, Ciudad de La Habana.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F., E. FLORES VALDÉS (1995), *Esquema de Circulación Subterránea del río San Antonio de los Baños, Habana*. Resumen. Archivo, Inst. Nac. Recursos Hidráulicos, 2.
- MOLERIO-LEÓN, L.F., MA. I. GONZÁLEZ GONZÁLEZ, E.O. PLANOS GUTIÉRREZ (2015), “Singularidades de la gestión de acuíferos insulares en el trópico húmedo: Ciclo urbano del agua en La Habana, República de Cuba”, en Vammen, K. y A. de la Cruz Molina [Editores] (2015), *Desafíos del Agua Urbana en Las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias*. UNESCO-IANAS, México, pp., 236-255.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. Y M. GUERRA OLIVA (1980), *Notas sobre la Problemática Hidrogeológica del Polje Jaruco-Aguacate, Habana-Matanzas*, Archivo, Instituto de Hidroeconomía, Ciudad de La Habana, 60.
- MOLERIO LEÓN, L.F; M.G. GUERRA OLIVA, R.M. LEAL (2013), *Modelo Difusivo de Transporte de Masa (Algoritmo Adriana, Versión 2.91) y Curvas de Retención de Humedad en la Zona No Saturada de los acuíferos cársicos (Modelo RETC). Aplicación a las cuevas del tercio superior del curso subterráneo del río San Antonio, Artemisa, Cuba*. Mapping Latino. 23 Septiembre 2013, 51.
- MOLERIO LEÓN, L.F., M.G. GUERRA OLIVA, E. ROCAMORA ÁLVAREZ, J.C. TORRES RODRÍGUEZ (1999), *Esquema de circulación subterránea del río San Antonio de los Baños, Habana*. Archivo, Inst. Nac. Recursos Hidráulicos, 12.

- MOLERIO LEÓN, L.F., P. MALOSZESWSKI, M.G. GUERRA OLIVA, D.M. ARELLANO, K. DEL ROSARIO (2002), “Hidrodinámica isotópica de los sistemas acuíferos Jaruco y Aguacate, Cuba”, *Ing. Hdr. y Ambiental, La Habana, XXIII (2)*, pp., 3-9.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F.; P. MALOSZEWSKI; M.G. GUERRA OLIVA; O. A. REGALADO; D. M. ARELLANO ACOSTA; C. MARCH DELGADO, K. DEL ROSARIO (1993), “Dinámica del Flujo Regional en el Sistema Cársico Jaruco-Aguacate, Cuba”, en *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEATECDCOC-835*, Viena, pp., 139-174.
- MOLERIO LEÓN, L.F., M. PIN, M.G. GUERRA (2007), “Diseño de la Red de Monitoreo de Tritio en las Aguas Subterráneas de la Cuenca de Vento, Habana, Cuba”, *Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra*, Madrid, Octubre-Noviembre, 32.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F. Y JULIO J. VALDÉS RAMOS (1975), “Problemas y Perspectivas de la Investigación Geoespeleológica en Cuba”, *Tecnológica*, La Habana, XIII(3), pp., 32-35.
- MOLERIO LEÓN, L.F. Y ANA M. SARDIÑAS GÓMEZ (2024), Fuentes de incertidumbre en la evaluación de los recursos de agua subterránea en el karst cubano”, *Revista Maya de Geociencias*. Suplemento abril 2024, pp., 33-54. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Depto Académico de Ciencias de la Tierra.
- MOLERIO-LEÓN, L.F., ERCILIO VENTO, ANA MARGARITA SARDIÑAS (2024), “La conexión subterránea entre Madruga y Matanzas. El Igepitosaurio”, *Boletín del Grupo IGP-SCG*, La Habana, Año 12(141), Febrero de 2024, La Habana, pp., 5-6.
- MONTOULIEU, ENRIQUE J. (1940), “Comentario al trabajo del Ing. J. Brodermann”, *Revista de la Sociedad Cubana de Ingenieros*, 34 (2), pp., 315-319.
- MORALES Y PEDROSO, LUIS (1940), “Comentario al trabajo del Ing. J. Brodermann”, *Revista de la Sociedad Cubana de Ingenieros*, 34 (2), pp., 322-326.
- NICOD, J. (2003): “A Little contribution to the karst terminology: special oraberrant cases of poljes”, *Acta Carsologica* 32(2), pp.,29-39.
- NÚÑEZ JIMÉNEZ, ANTONIO (1954), *Geografía de Cuba*. Editorial Lex, La Habana 411.
- NÚÑEZ JIMÉNEZ, A. (1964), “Notas geográficas y geomorfológicas de Cuba”, In Furrázola-Bermúdez, G., Judoley, C., Mijailovsskaya, M., Novojetsky, I. y Nuñez, J.A. (1964), *Geología de Cuba*. La Habana, 329.
- NÚÑEZ JIMÉNEZ, A. (1985), “La Laguna de Ariguanabo. Simp. XLV Aniversario Soc. Espeleológica de Cuba”, en Núñez Jiménez, A. (1990), *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II*, Imprenta Central de las FAR, La Habana, pp., 316-319.
- PALMER, R.H. (1934), “The geology of Habana, Cuba, and vicinity”, *Journal of Geology*, 42 (2), pp., 123-145.
- PORTELA, P.A., F.A. BARRIOS., R. DEL BUSTO., E. SAN MARTIN., A.R. MAGAZ., M. TEJEDA Y R. SECO (1988), *Mapa Geomorfológico de las provincias La Habana y Ciudad de La Habana a escala 1:250,000*. Instituto cubano de Geodesia y Cartografía.
- ROGLIC, J. (1952), “Les surfaces de corrosion dans le Karst Dinarique”, Proc. Gen. Assembly, 8th Internatl Geograph. Congr. 17th, Washington DC, pp., 363-369.
- ROGLIC, J. (1964), “Les polje du Karst Dinarique et les modifications climatiques du quaternaire”, *Rev. Belge. Geograph*, n° 88(1-2), pp., 105-125.
- ROGLIC, J. (1965), “The delimitations and morphological types of the Dinaric Karst”, *Nase Jame*, n° 7(1-2), pp., 12-20.



- ROGLIC, J. (1974), “Les caractères spécifiques du Karst Dinarique”, *Centre Nat. Rech. Scientifique. Mem, Et Docs* 15, pp., 269-278.
- RUDOVOL, ALEXEI G. (1975), *Informe sobre los resultados de las investigaciones hidrogeológicas en la parte sur de la provincia de La Habana* (zona costera Sur con la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas dulces). Grupo Hidráulico Nacional, La Habana, 225.
- SÁNCHEZ, Y., O. MÉNDEZ, A. HERNÁNDEZ (2018), “Evaluación de la Cuenca subterránea Vento con el modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP)”, *Revista Hidrolatinoamericana*, 2, pp., 29-32.
- SUÁREZ GONZÁLEZ, O.A., D. R. FUENTES RODRÍGUEZ, M. VEGA CARREÑO, R. M. VALCARCE ORTEGA, W. RODRÍGUEZ MIRANDA (2019), *Aplicación de la metodología RISK modificada para evaluar la vulnerabilidad natural de la Cuenca Almendares Vento. GEO14-05. VII Convención de Ciencias de la Tierra-Geociencias 2019*, La Habana, Cuba.
- SANDERS, E. M. (1921), “The Cycle of Erosion in a Karst Region (After Cvijic) Hydrographie Souterraine et Evolution Morphologique du Karst by Jovan Cvijic” *Geographical Review*, 11 (4), pp., 593-600.
- SOKOLOV. D. S. (1967), “Hydrodynamique zoning of karst water. Proc; Symp. on Hydrol. Of Fractured Rocks”, *AIHS, UNESCO*, pp., 204-207.
- SWEETING, M.M. (1973), *Karst Landforms*. Columbia Univ. Press, New York, 362.
- VARELA MOREJÓN, E., L.F.MOLERIO-LEÓN, M.G.GUERRA-OLIVA (1978), “Comportamiento hidrodinámico de la fuente de La Gloria, Valle de San Juan, Matanzas”, *Voluntad Hidráulica*, 15 (46), pp., 1-3.
- VRBA, JAROSLAV (1967), *VyzkumpodzemnyvodyvPani Vento* (Investigaciones hidrogeológicas en la Cuenca de Vento, en checo), Archivo GEOFOND, Praga, 101.
- YANKOV, PETER (1974), *Recursos de explotación de la cuenca de Vento*, Grupo Hidráulico Nacional, La Habana.
- YRAOLA RODRÍGUEZ, JAVIER, YUDIELBALDROQUÍN REYES, DELAYNE DE LA C. RODRÍGUEZ ECHEVARRÍA, MARLON ALADRO PÉREZ, MICHAEL MACHADO DARIAS Y RAIDEL SOSA ARMAS (2023), “Cuevas del Paisaje Protegido “Valle del Río Ariguanabo”, Cuba (I)”, *Gota a Gota* nº 28, pp., 55-62.

Este trabajo se citará como: MOLERO LEÓN, L.F. (2024): “Hidrología del cinturón de poljes Ariguanabo-Cañas-¿San Juan? (Cuba) y el problema de la gestión ordenada de sus recursos hídricos”, *Mundo Subterráneo*, nº 10, pp.10-49, Grupo de Espeleología Nivel 10 (ed.)