

**I TALLER INTERNACIONAL
SOBRE CUENCAS EXPERIMENTALES
EN EL KARST**

Matanzas, 6-11 de Abril de 1992, CUBA



GTICEK

H. J. Llanos, I. Antigüedad, I. Morell & A. Eraso (Eds.)

Publicacions de la Universitat Jaume I de Castelló

I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst
H.J. Llanos, I. Antigüedad, I. Morell & A. Eraso (Eds.)

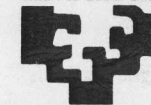


Universidad



Politécnica de Madrid

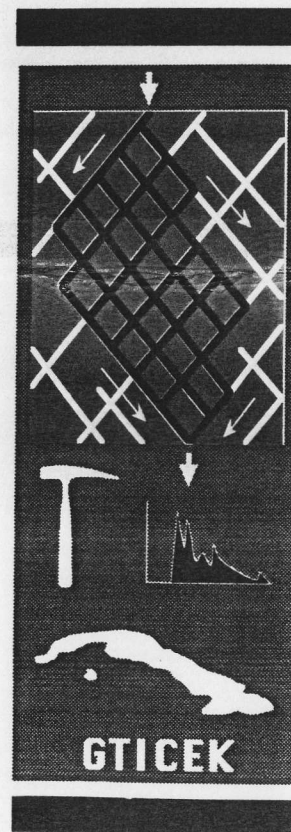
eman ta zabal zazu



Universidad Euskal Herriko
del País Vasco Unibertsitatea



UNIVERSITAT
JAUME-I



**I Taller
Internacional
sobre Cuencas
Experimentales
en el Karst**

Matanzas (Cuba). Abril, 1992

LIBRO DE COMUNICACIONES

Editores

H.J. Llanos, I. Antigüedad, I. Morell & A. Eraso

- Mangin, A. (1981 a). Utilisation des analyses corrélatore et spectrale dans l'aprove des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sc. Paris, 293: 401-404.
- Mangin, A. (1981 b). Apports des analyses corrélatore et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sc. Paris, 293: 1011-1014.
- Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatore et spectrale. J. Hydrol., 67: 25-43.
- Mangin, A. y Pulido Bosch, A. (1983). Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de los acuíferos kársticos. Tecniterrae, 51: 53-65.
- Obarti, F.J. (1987). El análisis de sistemas aplicado a la hidrogeología kárstica. Tesis Lic., Univ. Granada, 230 p.
- Padilla, A. (1990). Los modelos matemáticos aplicados al análisis de los acuíferos kársticos. Tesis Doc., Univ. Granada, 267 p., (inédito).

DESARROLLO MORFOGENÉTICO Y DINÁMICA DEL FLUJO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CUENCAS JARUCO Y AGUACATE

M. G. Guerra Oliva y L. F. Molerio León

Centro de Investigaciones de los Recursos Hidráulicos, INRH, Cuba

RESUMEN

El lapso Neógeno-Cuaternario en el archipiélago cubano presenta un cuadro geológico que en sentido general es simple; su complicación reside en el tipo de relaciones tectonofaciales que se presentan a diferentes escalas entre las series litológicas que lo constituyen, las cuales influyen directamente en la evolución morfodinámica e hidrodinámica del curso de llanuras del país que conforman, aproximadamente, el 90 % de la superficie carsificada en Cuba.

Por la importancia económica que representan sus recursos hidráulicos y por sus particulares condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, los sistemas cársicos de Jaruco y Aguacate, en el occidente de Cuba, fueron incluidos en el proyecto RLA/8/0/4, del Programa de Arreglos Regionales Cooperativos para la promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina, auspiciado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para esclarecer mediante técnicas de hidrología isotópica la dinámica del flujo subterráneo entre ambas unidades.

Las investigaciones geomorfológicas constituyen una importante herramienta auxiliar que contribuye en las diferentes etapas de investigación a esclarecer la influencia que ejerce la componente morfoestructural del relieve en el comportamiento de los patrones hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos en estos acuíferos cársicos. En el trabajo se muestran los resultados de las investigaciones geomorfológicas realizadas en este importante territorio encaminadas a la identificación y caracterización de los diferentes sistemas del flujo subterráneo.

Las características morfohidrogeológicas del territorio fueron cartografiadas a escala 1:50000. Tal esquema muestra las relaciones reconocidas entre las unidades morfoestructurales, las superficies morfogenéticas y la dinámica de las aguas subterráneas de esta región.

INTRODUCCIÓN

En 1989, la cuenca Jaruco-Aguacate, uno de los acuíferos cársicos más importantes de Cuba, fue incluida dentro del programa ARCAL-XIII, auspiciado por el organismo Internacional de Energía Atómica. Ese año fue implantada para el monitoreo de isótopos estables (^2H y ^{18}O) y radioactivos (^{14}C y ^3H) de las aguas de lluvia y subterráneas en un grupo de estaciones distribuidas a lo largo de los principales ejes del flujo subterráneo.

En el año 1990, fue elaborado un primer reporte que resumía las características hidrogeológicas más significativas del sistema hidrogeológico y se esbozaban algunas consideraciones en base a los primeros resultados que, en materia de hidrología isotópica, habían sido obtenidos.

Como apoyo a estas investigaciones hidrogeológicas se realizaron igualmente trabajos de cartografía geomorfológica de campo y de interpretación aereofotográfica y morfométrica, de lo que resultó un esquema geomorfológico de las cuencas a escala 1:50 000.

Aunque todavía resulta insuficiente, la información disponible favorece la confirmación de muchas de las hipótesis iniciales de trabajo. Evidentemente algunos aspectos requieren de estudios más detallados, teniendo en cuenta las condiciones de organización del flujo subterráneo en el sistema acuífero cársico.

La llamada cuenca Jaruco-Aguacate exhibe una peculiar problemática hidrogeológica que puede resumirse en los siguientes aspectos (2,5,6,7,8). Todo el potencial acuífero se restringe a los depósitos carbonatados del Neógeno que se extienden sobre un área de 700 Km².

El acuífero presenta su zona de descarga bien definida; una al Suroeste de las inmediaciones del poblado de Catalina de Guines y la otra al Este, cerca de la ciudad de Matanzas. Ambas zonas se encuentran aproximadamente a la misma latitud pero a diferentes alturas, así la del Oeste descarga en cota +60 y la del Este en cota +30m.

Estas descargas individualizan dos unidades hidrogeológicas: Jaruco, la occidental, y Aguacate, la oriental. Sin embargo, su divisoria subterránea no se conoce con precisión, aunque en principio se sitúa a la altura del poblado de Aguacate.

ESTRUCTURA GEOLÓGICA

El cuadro geológico general del territorio no es complicado, sin embargo no están claras algunas relaciones tectonofaciales entre los paquetes de sedimentos carbonatados y carbonatados terrígenos del Neógeno que constituyen el acuífero en estudio, que a su vez presenta diferente grado de acuosidad relativa en función de su composición sedimentológica, agrietamiento, posición espacial e intensidad de la carsificación.

Las unidades que conforman el acuífero son las siguientes:

Fm	Litología general
Formación Jaruco:	Mioceno inferior. Calizas arcillosas de color crema a blanco, textura media a fina, generalmente masivas. La unidad tiene un espesor aproximado de unos 100 metros.
Formación Husillo:	Mioceno inferior. Calizas organógenas y organodetríticas de grano fino, calizas biohérmicas y calizas fragmentarias. El espesor no sobrepasa los 40 metros.
Formación Cojimar:	Mioceno medio. Calizas organógenas y organodetríticas y calizas arcillosas interestratificadas con margas. El espesor máximo no parece ser superior a los 150 metros.
Formación Guines:	Mioceno inferior medio. Calizas organógenas, coralinas, organodetríticas, organógeno relictas, recristalizadas, dolomitas calcíticas calcáreas.

Estas unidades conforman esencialmente el acuífero carbonatado de la cuenca.

En este contexto geológico-hidrogeológico se realizaron las investigaciones geomorfológicas colaterales que, posteriormente, fueron correlacionadas con los resultados de la interpretación hidrogeológica en las estaciones seleccionadas.

CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS UNIDADES MORFOESTRUCTURALES Y LAS SUPERFICIES MORFOGENÉTICAS

En el área de estudio se reconocieron las siguientes superficies morfogenéticas y escalones morfoestructurales (1,2):

Relieve de llanuras bajas	+ 0 + 50 m
Relieve de llanuras altas	+ 50 + 100 m
Relieve de articulación	+ 100 + 150 m primer escalón, + 150 + 200 m segundo escalón
Relieve de montañas bajas	+ 200 + 500 m

Morfogenéticamente a escala regional se reconocen las siguientes relaciones entre estas superficies:

Escalones Morfoestructurales	Edad relativa	Condiciones morfogenéticas predominantes
Llanuras bajas	Q2	abrasivas
Llanuras altas	Q1-Q2	abrasivas
Relieve de articulación	N1-N2	abrasivas denudativas
Relieve de montañas bajas	N1-N2	denudativas

Para el análisis de la evolución del área, se reconocieron 31 formas del relieve, que fueron procesadas mediante la aplicación del análisis combinatorio aplicado a las interpretaciones geomorfológicas, confeccionándose la matriz especial correspondiente entre los procesos geomorfológicos y las formas del relieve. La frecuencia resultante es la siguiente:

Proceso	Frecuencia
Fuerza de los fluidos	31
Interacción relieve fluido	31
Gradación y pendiente	31
Reducción de la roca	29
Denudación	29
Corrosión	28
Disolución	28
Efectos endogenéticos	24
Fallas	22
Movimientos oscilatorios	19
Pliegues	18
Transporte de sedimentos	16
Formación de valles	10
Formación de meandros	9

De aquí resultó la siguiente expresión morfogenética o grado de evolución:

$$Em = (31), (29+28), (24), (22), (19+18), (16), (10+9)$$

y donde se reconocen los siguientes caminos de red:

(29+28) = reducción de la roca , denudación + corrosión , disolución

(19+18) = movimientos oscilatorios + pliegues

(10+9) = formación de valles + formación de meandros

y la expresión morfoclimática es (19H), (10H-S), (3S)

lo que indica que de las 31 formas del relieve reconocidas en el esquema geomorfológico 1: 50000, 19 se originaron en períodos húmedos, 10 en húmedos-secos y 3 solamente en condiciones secas.

Los valores de estadística descriptiva que caracterizan a la acción de los procesos geomorfológicos sobre las formas del relieve son:

Moda	31 fuerza de los fluidos
Mínimo	9 formación de meandros
Mediana	20.5 fallas
Media	20.6 movimientos oscilatorios
Recorrido	22 fallas y grietas en general

Estos valores reflejan la influencia de cada proceso en la formación del relieve actual de la región. Los caminos formados con la expresión morfogenética reflejan el carácter lineal o no lineal de la evolución morfogenética del área. Los procesos que presentan linearidad o no son los siguientes:

Procesos	Lineal	No lineal
Fuerza de los fluidos		X
Reducción de la roca	X	
Denudación	X	
Corrosión	X	
Disolución	X	
Efectos endogenéticos		X
Fallas		X
Movimientos oscilatorios	X	
Pliegues	X	
Transporte de sedimentos		X
Formación de valles	X	
Formación de meandros	X	

Sobre este contexto geomorfológico se analizaron los morfoalineamientos, interpretados en base a la fotointerpretación y la morfometría. Se diferenciaron los siguientes tipos de morfoalineamientos:

- Prolongación inferida de los cambios de dirección en los valles fluviales en las llanuras
- Sectores lineales de escarpes y pendientes denudativas

Para la morfoestructura o cuenca Aguacate se realizaron las siguientes mediciones de los morfoalineamientos:

Sectores lineales de escarpes y pendientes denudativas cársicas

Se analizaron un total de 90 sectores de este tipo, entre los ríos San Agustín y San Juan, aguas abajo de la descarga este de la cuenca. Los valores estadísticos obtenidos son:

Estadística descriptiva del azimut del agrietamiento

Mínimo	0
Máximo	230
Medio	94
Mediana	90
Desviación estandar	51
Rango intercuartil	79
Cuartila inferior	53
Cuartila superior	132

Esto significa que el 50% de los azimut está en el rango comprendido entre 53 y 132, es decir un 25% por debajo de 53 y el restante sobre 132. Interpretación válida para las siguientes datas.

En la vertiente oeste del río San Juan, se analizaron un total de 20 alineaciones de la prolongación inferida de los cambios de dirección en los valles fluviales en las llanuras:

Estadística descriptiva del azimut de la rectificación de la red fluvial

Mínimo	5
Máximo	180
Medio	63
Rango	175
Mediana	47
Cuartila inferior	20
Cuartila superior	87
Desviación estandar	56

En el sector del paleo valle del río San Agustín, la prolongación inferida de los cambios en los valles fluviales en las llanuras, presenta la siguiente estadística descriptiva:

Mínimo	5
Máximo	174
Medio	78
Desviación estandar	49
Rango intercuartil	169
Cuartila inferior	45
Cuartila superior	120
Mediana	75
Rango	74

Para el sistema cársico o morfoestructura Jaruco el análisis de los morfoalineamientos dió los siguientes resultados:

Mínimo	0
Máximo	275
Medio	89
Desviación estandar	45
Rango intercuartil	63
Cuartil inferior	62

Cuartil superior	125
Rango	275
Mediana	90

El total de morfoalineamientos analizados en toda la cuenca fue de 321.

Para los dos sistemas cársicos Jaruco y Aguacate, los valores estadísticos que caracterizan la distribución espacial de los morfoalineamientos oscilan entre los siguientes valores:

Mínimo	0-5
Máxima	50-180-174-275
Medio	63-78-94
Mediana	47-75-90

SISTEMAS DE FLUJO Y ESTRUCTURA DEL CAMPO DE PROPIEDADES FÍSICAS

Sistemas de flujo

La regionalización hidrogeológica del carso cubano (28,29,30) ha permitido distinguir 31 regiones cársicas en el País. En muchas de éstas se ha logrado identificar estructuras de flujos locales e intermedias (31) que se corresponden con unidades morfogenéticas individuales, con diferente grado de relación hidrodinámica mutua, pero englobadas en el sistema de flujo regional.

En el territorio estudiado pueden diferenciarse dos sistemas regionales de flujo: Jaruco al Oeste y Aguacate al Este, integrados por un conjunto de indicadores menores caracterizados por tipos particulares de formas del relieve que se origina: el escurrimiento subterráneo, de alimentación, descarga de las aguas subterráneas, de límite y relación con el sistema regional, además de una topología singular y distintos caracter del flujo, forma, desarrollo y de condiciones de contorno (3,6,8). Las investigaciones isotópicas e hidroquímicas llevadas a cabo han confirmado la subdivisión hidrogeológica del territorio (5) y, por supuesto, añadieron mejores precisiones e introdujeron la posibilidad de distinguir algunos sistemas locales de flujo. A modo de resumen la siguiente tabla muestra las características fundamentales de las unidades hidrogeológicas identificadas hasta el momento. Su distribución geográfica se observa en el mapa geomorfológico (5) mostrando su correspondencia con el relieve.

Unidades hidrogeológicas reconocidas en el territorio

Sistema regional de flujo	Sistema local	Tipo morfológico	Alimentación	Descarga
Jaruco	Americano	trop plain	autóctona	concentrada episódica
	Hoyo de la Burra	dolina lacustre	autóctona	difusa epis.
	Oeste	fondo de polge	autóctona	difusa epis.
	Maguan	llanuras altas	autóctona	difusa epis.
	Caraballo	llanuras altas	híbrida	difusa estacional

Aguacate	Bello	valle surgente	híbrida	difusa permanente
	La Gloria	valle surgente	híbrida	concentrada permanente
	Sierra del Grillo	montañas bajas	autóctona	----
	Sierra de Camarones	montañas bajas	autóctona	difusa permanente
	Valle de Picadura	fondo de valle	híbrida	----

Estructura del campo de propiedades físicas

La información necesaria en este sentido (conductividad hidráulica, transmisividad y almacenamiento en la zona saturada) fue obtenida de ensayos de dilución puntual en pozos, procesamiento de ensayos de caudal en éstos y análisis de las curvas de recesión de los manantiales Ojo de Agua, La Gloria y Bello. La mayor información de pozos corresponde a la unidad Jaruco.

Transmisividad y almacenamiento en pozos

Del procesamiento de los ensayos de bombeo en unos 90 pozos aforados en la unidad hidrogeológica Jaruco (1,5,6) fue posible caracterizar, a escala de pozos, la estructura del campo de transmisividades y almacenamiento en el sistema. La distribución espacial del campo de transmisividades permitió interpretar las direcciones principales de anisotropía y de flujo regional a partir del elipsoide de T. Este análisis derivó que las direcciones principales de anisotropía se orientan a 45, 85, y 340 grados respecto al centro de gravedad del campo de pozos del acueducto El Gato.

Estos valores indican que al correlacionarlos con los azimut calculados del sistema de morfoalineamientos de los dos sistemas hidrogeológicos, la relación que se establece es la siguiente:

Valores calculados en los pozos	Estadígrafos descriptivos	Error en grados
45	valor máximo y mediana	5
85	media y mediana	5
160	valor máximo	14

HIDRODINÁMICA GEOQUÍMICA

Patrones de flujo

Como regla, en el territorio bajo estudio, el modelo hidrodinámico geoguímico regional muestra el siguiente comportamiento, de la zona de recarga a la descarga.

Aumenta: SPC, Na, Mg, SO₄, HCO₃
Disminuye: Ca, Cl

De esta forma se puede identificar una dirección del flujo a partir de la relación Mg/Ca. Ubicando los pozos en el mapa geomorfológico (5), las direcciones del flujo son:

K-27	K-28	HJA-1
K-10	HJA-1	
HJ-5	zona de concentración del flujo	
HJA-4	HJA-2	
LSC-1	HJA-3	

Correlación entre los azimut de las alineaciones que orientan el flujo de las redes geoquímicas y la dirección del campo T

La primera dirección coincide con el borde de la segunda terraza del paleo valle del río San Agustín, con azimut medio de 87 grados, dos sobre el valor de 85 grados reportado como una de las direcciones de la transmisividad calculadas por los valores obtenidos en los pozos muestreados.

La dirección del flujo entre el K-10 y el HJ-1, sigue una compleja red de agrietamiento para realizar su conexión. Los azimut predominantes son 45, 135 y 140 grados, alineados sobre estructuras enterradas, por debajo del curso superior del paleo valle del río San Agustín, que hacia el Oeste del pozo K-10 fluyen por debajo de una división geomorfológica que complica el límite de dos morfoestructuras de carácter local.

La relación hidrogeológica entre el HJ-4 y el HJ-2, está determinada por una estructura de carácter regional que se desarrolla muy próxima al límite subterráneo de las dos unidades hidrogeológicas. Los azimut que caracterizan a esta estructura son del orden entre los 45 y los 50 grados, lo que coincide con el valor de 45 grados obtenido en los ensayos de pozos como dirección de la transmisividad.

Por último, el escarpe oeste del paleovalle del arroyo El Americano, determina la conexión hidráulica entre los pozos LCS-1 y el HJA-3. Esta dirección de alineación tiene azimut entre los valores de 35 y 40 grados, que también coincide con el valor de 45 grados dado en los análisis de los pozos, lo que indica un error que oscila entre los 2 y los 25 grados de azimut entre estas dos circulaciones subterráneas, transmisividad y geoquímica en estos sistemas cársicos.

Para ambos casos tratados, es decir la transmisividad y la relación Mg/Ca, las condiciones de sedimentación y la neotectónica, así como errores propios de la cartografía pueden influir en el grado de exactitud de la relación establecida. Investigaciones realizadas en las llanuras cársicas cubanas reflejan que las relaciones biunívocas que se establecen entre el relieve y la estructura geológica no son muy satisfactorias.

CONCLUSIONES

Se relacionaron los valores de relaciones entre los azimut de la transmisividad y el almacenamiento con las direcciones de los morfoalineamientos obteniéndose errores en los valores de 5 y 14 grados.

Los valores de errores obtenidos entre la dirección del flujo de las aguas subterráneas interpretadas a partir de la relación Mg/Ca y las direcciones del campo T, con las líneas de alineamientos, que reflejan en superficie sus redes de flujo oscilan entre los 2 y los 25 grados de inclinación.

La cartografía geomorfológica realizada muestra un cuadro morfoestructural regional acorde con las interpretaciones hidrogeológicas realizadas. Localmente, la exactitud de la correlación entre las superficies y las condiciones hidrogeológicas parece depender de la escala a que se realice la cartografía geomorfológica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guerra Oliva, M.G. (1985). Mapa de las regiones morfoestructurales de Cuba 1: 1 000 000. Arch. CIRH.
- [2] Guerra Oliva, M.G y Molerio León, L. (1981). Mapa morfohidrogeológico del polje Jaruco Aguacate escala 1: 50 000. Arch. CIRH.
- [3] Molerio, L.; D. Arellano; A. Suri; A. Santos; K del Rosario y M. Guerra (1990). Dinámica de las aguas subterráneas en la cuenca Jaruco Aguacate. ARCAL XIII. RLA/8/014. Primera Reunión de Responsables de los estudios de los recursos y la contaminación de aguas subterráneas.
- [4] Guneva, S. (1967). Estudio hidrogeológico de la cuenca Jaruco Aguacate. Arch. INRH, La Habana, 210.
- [5] Guneva, S. (1967). Estudio hidrogeológico de los manantiales Bello, Matanzas. Arch. INRH, La Habana, 200.
- [6] Molerio, L. y M. Guerra (1981). Notas sobre la problemática hidrogeológica de la porción oriental del polje Jaruco Aguacate, Habana Matanzas. Arch. INRH, La Habana, 60.
- [7] Molerio, L. (1990). Hidrogeología y recursos de explotables del acueducto El Gato. Arch. INRH, La Habana, 180.
- [8] Molerio, L. (1991). Investigaciones hidrogeológicas en cuencas representativas del occidente de Cuba. Arch. INRH, La Habana, 200.