

ESTUDIO DE LAS FUENTES DE LAS AGUAS DULCES EN CAYO LARGO DEL SUR

Enrique D. López Infante

Unión de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Virtudes # 680, esq a Belascoain, Centro Habana, Ciudad de La Habana, Cuba, C. Electrónico: uiphc@ceniai.inf.cu

RESUMEN

El estudio de las fuentes de abasto existentes es una tarea esencial para la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas de un acuífero o de una cuenca hidrogeológica. Frecuentemente, las captaciones se diseñan y construyen de acuerdo con los parámetros obtenidos de las pruebas de caudal realizadas en las calas o pozos individuales, en las que son determinadas su transmisividad, permeabilidad, espesor del acuífero y el coeficiente de almacenamiento. A veces, después de construida la captación, se realizan las pruebas de caudal de corta duración, (con un período de tiempo menor de 48 h), de esta forma, se le garantiza al usuario la futura fuente de abasto. Sin embargo, con un largo período de extracción de las aguas subterráneas en las fuentes de abasto, las condiciones para las que estas fueron construidas cambian, debido a su ampliación, derrumbes, elevación del caudal y tiempo de bombeo, así como también, por los efectos de la doble porosidad, elevación de la zona de interfaz entre las aguas dulces y saladas y la influencia de las mareas oceánicas. Con la evaluación de las particularidades específicas de cada fuente de abasto, es posible diseñar y construir la captación más adecuada para las condiciones hidrogeológicas particulares del territorio investigado. En el presente estudio se realizó una investigación de las fuentes de abasto en Cayo Largo del Sur, con el objetivo de conocer el comportamiento de las captaciones en condiciones de una explotación prolongada. Se realizaron pruebas de caudal en 14 trincheras, aprovechando las paradas temporales y un muestreo hidroquímico de sus aguas, teniendo en consideración el efecto de las mareas. Con los resultados que se obtuvo se recomendó el tipo de captación, así como también el régimen de explotación de las fuentes de abasto. Además, se pudo esclarecer las causas de la elevación de la salinidad de algunas de las trincheras existentes.

ABSTRACT

The study of the existing sources of water supply is an essential task for the evaluation of the exploitable resources of underground waters of an aquifer or hydrological basin. Frequently catchings are projected and built in according to parameters received from flow tests performed in test borings or individual wells. In this borings have been determined the transmissibility, thickness of the aquifer and the coefficient of storage. Sometimes after the catching, flow tests should be done in short periods of time (less 48 hours) in this way the person who makes use of this source has the guarantee about the future source of water supply. However, having a long period of exploitation of underground waters in water supply resources, conditions that motivated their construction change because of its enlargement, failures, rise of the flow and time of pumping and also by rise of the interfaz zones between fresh and salty waters and the influence of oceanic tides. With the evaluation of specific particularity of each source of water supply it is possible to design and build the most adequated catchment for particular hydrogeological conditions of the investigated territory. In this work was performed an investigation of water supply sources in Cayo Largo del Sur in order to know how to do the catchment comnports in conditions of a long period of explotation. Flow tests were done in 14 trenches, taking advantage of temporary stops and a hydrochemical samples of its waters considering the effects of tide. With the obtained results was recommended the type of catchment and also the region where water supply source will be explotated. Moreover the causes of the rise in the salinity of trenches could be understood.

INTRODUCCION

El estudio de las fuentes de abasto existentes es una investigación fundamental para la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas en un acuífero, en una cuenca hidrogeológica, en una isla o en un cayo. Frecuentemente, estas se diseñan y construyen de acuerdo con los parámetros obtenidos de las pruebas de caudal realizadas en las calas o pozos individuales, en las que son determinadas su transmisividad, permeabilidad, espesor del acuífero y el coeficiente de almacenamiento. A veces, después de construida la captación, se realizan las pruebas de caudal de corta duración, (con un período de tiempo menor de 48 h), de esta forma, se le garantiza al usuario la futura fuente de abasto. Sin embargo, con un largo período de extracción de las aguas subterráneas en las fuentes de abasto, las condiciones para las que estas fueron construidas cambian, debido a su ampliación, derrumbes, elevación del caudal y tiempo de bombeo, así como también por, los efectos de la doble porosidad, elevación de la zona de interfaz entre las aguas dulces y saladas y la influencia de las mareas oceánicas. Con la evaluación de las particularidades específicas de cada fuente de abasto, es posible diseñar y construir la captación más adecuada para las condiciones hidrogeológicas particulares del territorio investigado. Como resultado de este análisis, se realizó un estudio de las características de las fuentes de abasto existentes en Cayo Largo del Sur, para conocer la verdadera naturaleza del acuífero en condiciones de una explotación prolongada.

El estudio del régimen de trabajo de las captaciones existentes se realizó en las trincheras que actualmente son utilizadas para el abasto al turismo y a la población en general, sin la necesidad de perforar calas o construir excavaciones para evaluar las posibilidades de explotación del acuífero de las rocas oolíticas. Además, se utilizaron las propias bombas instaladas para realizar las pruebas de caudal, aprovechando las paradas temporales de las fuentes de abasto para la medición de los niveles dinámicos durante la recuperación y el bombeo de las aguas subterráneas. En la determinación del descenso y recuperación de los niveles dinámicos de las aguas subterráneas se emplearon limnigrafos. Al mismo tiempo, fueron observadas las variaciones del nivel del mar mediante el empleo de un mareógrafo situado permanentemente en Cayo Largo del Sur, con la finalidad de estudiar la posible influencia de la marea durante el proceso de explotación. Este puede verse en la Foto 1. El análisis de los resultados de las pruebas de caudal en cada fuente determinó que el sistema de captación del tipo dren soterrado (T-1,2 – T-3) es el más apropiado para la realización de un bombeo de explotación. Es oportuno señalar, que fue necesario realizar una evaluación detallada de toda la información sobre las captaciones, la realización de pruebas de caudal en 14 trincheras, la reinterpretación de las investigaciones geofísicas y el levantamiento geológico de la parte emergida y del contorno del área de Cayo Largo del Sur sumergida en el mar.

MATERIALES Y METODOS

Cayo Largo está compuesto por espesores de capas independientes, donde se observan calizas arrecifales cavernosas y arenas compactas o blandas que las cubren. También existen formaciones arcillosas arenosas de laguna. Las descripciones litológicas de las rocas que conforman el corte, caracterizadas a través de los núcleos determinaron la existencia de una capa de rocas de composición oolítica con un espesor entre 10 y 13 m, como se puede ver en la Foto 2. En algunas partes del corte, la porción inferior de ésta primera capa está menos consolidada y se describe como arena con cemento calcáreo y granos de considerable tamaño y otra zona suprayacente, mucho más consolidada, describiéndose como caliza oolítica, bastante compacta, muy porosa, de color blanco, de textura masiva y algo arcillosa. Pero en ambas zonas la roca está constituida por oolitos con formas esféricas y elípticas en una matriz de calcita recristalizada donde se observan las estructuras concéntricas bien definidas. A partir de los 10 m aproximadamente, los pozos penetran una caliza recristalizada, organógena, cavernosa, pelitomórfica, con organismos recristalizados confundidos con la matriz, algunas veces de color blanco y otras de color rojo, algo grisáceo. Esta última capa puede representar una superficie de erosión caracterizada por su cavernosidad, lo cual argumenta sobre un período subaéreo posterior a su consolidación, y que sobre ella se depositaron posteriormente las arenas oolíticas.

Etapé, J. A., en su esbozo geológico manifiesta que la configuración del cayo ha sido modelada por los procesos tectónicos, lo que puede observarse claramente en la línea de la costa por el cambio en forma de salto en el perfil de playa, lo cual caracteriza un tectonoalineamiento. Estas fallas, con rumbo sudoeste – noreste se asocia a los procesos orogénicos que formaron el contorno actual de la isla, eventos más antiguos que los tectonoalineamientos transversales, con rumbo noroeste –sudeste, de edad más reciente. También determino, que estas fallas no sólo se descubren observando los alineamientos.

mientos de la parte emergida del cayo, sino que continúan y pueden correlacionarse en el sector sumergido y en el talud insular. Los depósitos sedimentarios que conforman el cayo se caracterizan en su borde septentrional por material terrígeno y turboso de pantano y de mangle. Por el frente meridional, los complejos de playa – duna recientes son arenas carbonatadas oolíticas de grano medio. En ningún caso abundan las conchas de moluscos u otros macroorganismos. Estos complejos alcanzan un ancho de 8 a 10 m, y como regla presentan una pendiente abrupta hacia el mar. En la actualidad se observa la playa erosionada y el avance del mar hacia la tierra, la parte central del cayo está formada por una sucesión de dunas paralelas a la costa, decreciendo en altura hacia el norte.

Para una zanja parcialmente penetrante en un acuífero libre, con el régimen estabilizado, se utilizó la fórmula de Numerov-Pascu, la cual tiene la siguiente expresión:

$$q = ks_0 \left[\frac{-s_0 + 2H_0 - 2a_1}{L + \frac{l}{2}} + \frac{1}{\frac{L}{2a_1} - \frac{1}{\pi} \ln \sinh \frac{\pi d}{4a_1}} \right]$$

donde:

q – caudal por unidad de longitud en $m^3/d/m$.

k – permeabilidad en m/d

s_0 – descenso en m .

H_0 – espesor saturado inicial del acuífero en m .

L – longitud de influencia en m ; se calcula por la siguiente expresión $L = 2s_0\sqrt{kH_0}$.

l – ancho de la zanja en m .

a_1 – distancia desde el fondo de la captación hasta el límite del acuífero en m .

Es necesario tener en consideración en las captaciones el efecto de ascenso de la zona de interfaz como consecuencia de la explotación de las aguas subterráneas. Cuando se realiza la extracción de las aguas subterráneas en zonas cercanas a la costa, como ocurre en el horizonte acuífero de las rocas oolíticas en Cayo Largo del Sur, se produce, a veces, una elevación de la zona de interfaz entre las aguas dulces y saladas sobre su posición inicial. La elevación de la zona de interfaz puede ser calculada para una línea de drenaje horizontal según Bear-Dagan por la siguiente expresión:

$$\xi = \frac{\chi q}{2\pi\beta k_h} \ln \left(\frac{k'_v \beta}{2md} + 1 \right)$$

donde

ξ – elevación de la interfaz sobre la posición horizontal inicial en m .

m – porosidad efectiva (adimensional).

d – altura del dren horizontal sobre la interfaz en m .

χ – coeficiente de anisotropía igual a $\sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ (adimensional).

k_h y k_v – permeabilidad horizontal y vertical del agua dulce en m/d .

k'_v – permeabilidad vertical con la densidad del agua dulce y viscosidad promedio entre el agua dulce y salada en m/d .

β – relación de densidades (igual 1/40)

En el 50% de las captaciones para el abasto de agua dulce en Cayo Largo del Sur, se produce la elevación de la zona de interfaz como consecuencia de las características constructivas (largo, ancho y cota de fondo) y las condiciones en la explotación (caudal por unidad de longitud, descenso y tiempo). La mayor parte de las captaciones construidas son parcialmente penetrantes en el acuífero de las rocas oolíticas, y el límite inferior del agua dulce está formado por las calizas altamente carsificadas, las cuales se encuentran intrusionadas por las aguas del mar. En estas condiciones, los efectos de penetración parcial de las trincheras son más sensibles a la elevación de la zona de interfaz entre las aguas dulces y saladas, debido a la extracción, como se puede apreciar en la Fig 1. El conocimiento de la anisotropía del horizonte acuífero de las rocas oolíticas puede esclarecer el motivo por el cual se produce, a veces, la rápida elevación de la zona de interfaz en algunas de las trincheras existentes. Este parámetro podría ser evaluado a partir de las determinaciones de laboratorio de los núcleos obtenidos de la perforación de las calas de la red de observación.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las trincheras estudiadas durante el proceso de bombeo, fue posible observar que cada una tiene sus condiciones particulares, pero existen características semejantes en algunas, que hacen que su comportamiento durante la explotación sea similar, como por ejemplo: su construcción, caudales de bombeo, descenso y recuperación, mineralización de sus aguas y orientación en el terreno. Estas particularidades comunes facilitaron su agrupación. Al estudiar el régimen de extracción del campo de captación T-1,2, fue posible de observar el funcionamiento de un dren soterrado con una explotación prolongada, así como en que medida varía la mineralización en el tiempo.

En la actualidad, de las 14 captaciones en explotación, en 7 de ellas se bombea agua con mineralización mayor de 1 g/L de SST. En la generalidad de los casos, la causa de la alta mineralización en algunas captaciones ha sido atribuida a la intensa explotación de las aguas subterráneas. Sin dejar de descartar esta hipótesis, no han sido estudiados otros factores que sí influyen en la salinidad de las trincheras, como son: las oscilaciones de las mareas, el caudal por unidad de longitud, la penetración en el acuífero, la profundidad de la zona de interfaz, parámetros hidrogeológicos del acuífero y dirección de las estructuras geológicas.

En Cayo Largo no existe un modelo típico de captación, cada trinchera tiene diferentes parámetros constructivos, así como distintos caudales por unidad de longitud en la explotación. Según la opinión de E.W. Rochester y E.W. Krizsgs (1970), la extracción de las aguas subterráneas en las islas alargadas debe realizarse con drenes o galerías con una orientación paralela a la costa y por encima del nivel medio del mar. Sin embargo, en un gran número de captaciones no se cumplen estos requerimientos.

Las características constructivas de las trincheras T-4, T-5, T-6, T-7 y T-8 son las más desfavorables de todas las que son utilizadas como fuentes de abasto. La cota de fondo en todas se encuentra por debajo del nivel medio del mar, y como caso extremo se puede mencionar por ejemplo la trinchera T-4, la cual tiene una cota de fondo de $-2,0$ m. Los caudales por unidad de longitud son mayores de $2.0 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$ y la dirección de las trincheras es perpendicular a las estructuras geológicas, como es posible ver en la Fig 3. De acuerdo a las pruebas de caudal realizadas en estas trincheras con un tiempo de bombeo de 12 h, la recuperación de los niveles dinámicos a su posición inicial puede durar hasta 92 h en casos extremos, como por ejemplo en la trinchera T-6, como es posible ver en la Fig 2. De esta forma, no existe una relación directa entre el caudal extraído y el aporte del acuífero; las trincheras funcionan como una cisterna, una parte del agua corresponde al volumen almacenado y la otra parte de la formación acuífera. Como consecuencia de un descenso grande, se produce una elevación de la zona de interfaz. Según los cálculos realizados por el método de Porchet para el análisis de las curvas de descensos-tiempo, el caudal aportado por la formación corresponde a un 25 % del volumen extraído en la trinchera. En el esquema hidrogeológico confeccionado para este estudio, es posible observar que la dirección de las trincheras T-4, T-5, T-6 y T-8 es perpendicular a los morfoalineamientos y a las líneas equipotenciales, así como paralelas a las líneas de corriente. De esta manera, no es posible captar todo el flujo de las aguas subterráneas.

Para solucionar los problemas de salinidad en algunas trincheras, serían construidas prolongaciones del tipo dren soterrado, como por ejemplo: el sistema T-7,9 y en las trincheras T-3 y T-1,2. En este caso, la prolongación de la captación mediante un dren y la explotación en la trinchera no parece ser la solución, ya que la práctica lo ha demostrado. En las trincheras T-10, T-11, T-12A, T-12, T-13 y T-Cruz, se ha observado un régimen de trabajo normal cuando el período de bombeo y el de recuperación no es

mayor de 12 h . En algunos casos, cuando se ha excedido el tiempo de bombeo debido a las necesidades en el suministro de agua, se ha producido un aumento de la salinidad. Esto se debe al aumento de la zona de interfaz, ya que la captación no tiene un tiempo de reposo, como ejemplo se puede mencionar la trinchera T-13, la cual estuvo bombeando continuamente durante varios días hasta elevar su salinidad. Este grupo de trincheras, se encuentra orientado paralelamente a la línea costera y a las estructuras geológicas y su cota de fondo está por encima del nivel medio del mar. Estas condiciones influyen para que sean extraídas aguas con una mineralización menor de 1 g/L, al tener un caudal por unidad de longitud de $2 \text{ m}^3/\text{d/m}$ y un régimen de bombeo de 12 h diarias.

En el proceso de pruebas de caudal realizadas en las trincheras, se pudo observar que durante el bombeo se producen cambios de salinidad en las trincheras debido al efecto de las mareas, los cuales son más acentuados durante las mareas vivas. Durante la pleamar aumenta la salinidad y en la bajamar disminuye, la mineralización en estas condiciones puede variar de 0,2 a 0,5 g/L de S.S.T. Durante los períodos de grandes precipitaciones, ha sido posible observar también que la mineralización de las trincheras disminuye como resultado de la recarga del acuífero, la calidad del agua mejora. Sin embargo, estas condiciones se mantienen un corto período de tiempo (no mayor de 15 d), y paulatinamente se van restableciendo las condiciones de salinidad, estas particularidades muestran que el área de influencia de las trincheras se saliniza por la explotación y se desaliniza por las lluvias.

Como es posible observar en la Fig 3, la dirección de la captación T-1,2 es paralela a los morfoalineamientos y probablemente perpendicular a las líneas de corriente, lo que permite captar completamente el flujo de las aguas subterráneas. El caudal por unidad de longitud de dren es de $0,55 \text{ m}^3/\text{d/m}$, y debido a su poca penetración en el acuífero, la profundidad hasta el contacto entre las aguas dulces y saladas es mayor.

En el ensayo de bombeo de la captación T-1,2, los niveles dinámicos de las aguas subterráneas varían en dependencia del régimen de explotación del sistema en conjunto. En los primeros días, con la puesta en funcionamiento de la captación T-1,2 de forma continua y la trinchera T-3 con un bombeo cíclico de 12 h de duración, se pudo observar que a 450 m del punto de bombeo (cala A-17) los niveles de las aguas subterráneas permanecían inalterables por los efectos de la explotación, variando como consecuencia de la influencia de las mareas. Al mismo tiempo, en la trinchera T-3 y en la captación T-1,2 se ponía de manifiesto la influencia entre los dos sistemas (T-1,2 y T-3). Como resultado de esta influencia, cuando se detenía el bombeo de la trinchera T-3 se observaba la recuperación de los niveles dinámicos en la captación T-1,2. Debido a que en los bombeos cíclicos los descensos van aumentando paulatinamente, los niveles dinámicos en la trinchera T-3 llegaron a estar por debajo de la captación T-1,2, produciéndose un flujo inverso. Esto se puede apreciar en la Fig 4. Esta situación determinó que fuera detenido el bombeo de la trinchera T-3 por espacio de varios días, recuperándose los niveles dinámicos a una nueva posición de equilibrio. Un bombeo cíclico en la trinchera T-3 simultáneamente con uno continuo en la captación T-1,2, debe producir un descenso mayor en la trinchera T-3, y como consecuencia una elevación de la mineralización de sus aguas. En la actualidad, el dren soterrado T-1,2 funciona durante 24 horas al día.

La trinchera T-3, como se puede ver en el esquema geológico, se encuentra en una dirección perpendicular a las estructuras geológicas, lo que produce a su vez un descenso mayor del que realmente debiera ocurrir, y, además, no es posible captar todo el flujo de las aguas subterráneas. La unión de la trinchera T-3 con la captación T-1,2 no ha sido favorable, debido a su penetración en el acuífero y cota de fondo. Esta situación puede producir una elevación de la mineralización de la trinchera T-3 como resultado de la influencia de la T-1,2.

En las pruebas de bombeo realizadas en todas las captaciones, en las trincheras del tipo zanja no se produce la estabilización de los niveles dinámicos en 12 h de bombeo con los caudales extraídos, por lo que el régimen para los cálculos se considera como no estabilizado. Solamente, en la captación T-1,2 existe la estabilización de los niveles dinámicos, esto se debe a que el caudal por unidad de longitud se encuentra en equilibrio con la descarga del acuífero. Esta captación estuvo bombeando durante 45 d sin que se afectara la calidad de sus aguas y sin la existencia de abatimiento residual. Esto se debe a su gran longitud, correcta orientación y poca penetración en el acuífero, lo cual determina que el sistema sea más productivo y sin el riesgo de la elevación de la zona de interfaz.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tipo de captación en forma de dren soterrado es la más adecuada para la explotación de las aguas subterráneas en Cayo Largo del Sur, si es diseñada y construida teniendo en consideración las características hidrogeológicas. Existen otras formas de captación como las trincheras, donde se pueden obtener también resultados satisfactorios como por ejemplo:

T-10, T-11, T-12, T-13 y T-12 A, debido a su caudal por unidad de longitud y su ancho de fondo, pero con una explotación prolongada pueden ocurrir problemas de salinidad. Las trincheras, por sus características, requieren de una gran excavación siendo, susceptibles a la contaminación, y, además, modifican el entorno natural del cayo. En el caso de los drenes soterrados no ocurre lo mismo, necesitan poca excavación, y al estar enterrados se hace más difícil su contaminación.

Por los resultados de las pruebas de bombeo, se ha podido determinar que el caudal por unidad de longitud más representativo para la explotación de las trincheras debe ser de 1 a 0,50 m³/d/m con un tiempo de explotación de 12 a 18 h. Esto requiere, como es lógico, una longitud mayor de las captaciones o una disminución del caudal de bombeo actual, para obtener a largo plazo aguas con la calidad permitida, así como otras características constructivas, como son: cota de fondo por encima del nivel del mar y poco ancho.

Actualmente, las captaciones construidas en Cayo Largo del Sur no satisfacen completamente el abasto de agua con la calidad solicitada; se ha observado también la existencia de altas concentraciones de las sales solubles totales en la mayor parte de las trincheras, debido a los factores anteriormente mencionados. Estas condiciones no van a mejorar con las características actuales de explotación ya que el cayo necesita mayores volúmenes de agua para su desarrollo. Una solución más económica sería la ejecución de nuevas captaciones del tipo dren soterrado, las cuales se orientarían y construirían por los resultados obtenidos de la perforación de las calas de la red de observación.

Existe otra forma de captación de las aguas subterráneas, además de las trincheras o zanjas, que puede ser usada como fuente complementaria para el abastecimiento de agua. El aprovechamiento racional de las lagunas, puede ser, en este caso, una fuente adicional para el suministro. En Cayo Largo del Sur, en el límite con la zona B, se extiende un área, hasta la actualidad inexplorada desde el punto de vista hidrogeológico, donde se encuentran un gran número de lagunas, a veces de gran extensión (más de 2 km) y con un ancho de 50 a 100 m, las cuales se encuentran alineadas paralelamente a las estructuras geológicas y al mar. Estas lagunas pueden ser consideradas como trincheras naturales, las que representan el afloramiento de las aguas subterráneas del acuífero de las rocas oolíticas. Por esta razón, la extracción de sus aguas puede realizarse con un caudal máximo y un descenso mínimo.

CONCLUSIONES

1.- La elevación de la mineralización de las aguas subterráneas en las trincheras no depende solamente de la explotación, sino de otros factores, como: el caudal por unidad de longitud, la penetración en el acuífero de la captación, la influencia de las mareas oceánicas, la cota del fondo, la profundidad de la interfaz, el tiempo de bombeo y la orientación con respecto a las estructuras geológicas.

2.- Las características constructivas y la ubicación de las trincheras T-4, T-5, T-6, T-7, T-7,9 y T-8 son las más desfavorables de las que son utilizadas para el abasto de agua. Las trincheras T-10, T-11, T-12, T-12 A, T-13 y T-Cruz, con un régimen de trabajo de 12 h diarias, tienen un funcionamiento normal.

3.- Durante el bombeo de las trincheras se producen cambios de la mineralización debido a la influencia de las mareas oceánicas, las que varían desde 0,2 hasta 0,5 de S.S.T. Estas dependen de la amplitud de las mareas y de la distancia al mar de las trincheras.

4.- El sistema de captación T-1,2 ha resultado ser el más adecuado para las condiciones hidrogeológicas del cayo, debido a su bajo caudal por unidad de longitud (0,55 m³/d/m), poca penetración en el acuífero y una dirección paralela a las estructuras geológicas, lo que permite obtener aguas con la mineralización adecuada para el abasto con un tiempo prolongado de explotación.

5.- Las fuentes de abasto actuales no satisfacen el volumen de agua necesario para el abasto con la calidad requerida. Esta situación no va a mejorar, hasta tanto no sean sustituidas las trincheras con problemas de salinidad por nuevas captaciones del tipo dren soterrado, diseñadas y construidas con una argumentación hidrogeológica.

BIBLIOGRAFIA

1. - **Avello. O.** (1983). Estudios geológicos de la plataforma cubana.
2. - **Avello. O.** (1983). Sedimentos de la plataforma cubana.
3. - **Avello. O.** (1985). Estudios geológicos de la plataforma cubana.
4. - **Alcolado. M.** (1996). Proyecto de captación de la trinchera T-1,2. Cayo Largo del Sur.
5. - **Alpízar. F. H.** (1986). Informe hidrogeológico sobre las investigaciones realizadas en Cayo Largo.
6. - **Babushkin. O.** (1990). Levantamiento geólogo- geofísico en la Isla de la Juventud.
7. - **Broderman. J.** (1954). Posibilidades petrolíferas en la plataforma sumergida de la Isla de Cuba.
8. - **Custodio. E. y Llamas. M.** (1978). Hidrología subterránea. Tomos I y II.
9. - **Estapé. J. A.** (1998). Esbozo Geológico de Cayo Largo del Sur.
10. - **Fernández. A.** (1996). Programa de computación para el cálculo de los gastos de las trincheras en Cayo Largo del Sur.
11. - **Hernández. C.** (1998). Levantamiento geológico y búsqueda de minerales sólidos en el shelf de la isla de la Juventud.
12. - **Iturralde. M.** (1998). Estratigrafía de los cayos del archipiélago Sabana-Camagüey.
13. - **Kiriujin. A. V.** (1987) Hidrogeología regional.
14. - **Krumbein. C. W.** (1950). Stratigrafic and Sedimentation.
15. - **López. I. E.** (1996). Programa de investigaciones de Cayo Largo del Sur.
16. - **López. I. E.** (1997). Influencia de las mareas oceánicas en Cayo Largo del Sur.
17. - **López. I. E.** (1997). Estudio de la velocidad de filtración de las rocas en Cayo Largo del Sur.
18. - **López. I. E.** (1983). Aprovechamiento de las aguas subterráneas mediante la explotación de las lagunas, .
20. - **Mapa geológico de Cuba** a escala 1:250 000, hoja f 17-10.
21. - **Montoya. S.** Búsqueda de acumulaciones de arena marina en la plataforma sur de Matanzas.
22. - **Oceguera. L. J.** (1991). Abasto a la zona hotelera en Cayo Largo del Sur, interconexión T-7 y T-9.
23. - **Paulides. Y.** (1985). Condiciones para la formación de la oolita en las regiones someras de los mares tropicales.
24. - **Piñero. N.** (1998). Reinterpretación de las investigaciones geofísicas de la zona B de Cayo Largo del Sur.
25. - **Pokrishkin. V.** (1996). Búsqueda y reconocimiento de las fosforitas en la República de Cuba.
26. - **Pokrishkin. V.** (1964). Informe preliminar sobre la búsqueda de fosforitas en los cayos del archipiélago de los Canarreos.
27. - **Portela. H. A.** (1991). Mapa geomorfológico de Cayo Estopa - Cayo Largo, a escala 1:50 000.
29. - **Roselló. R. y Jachatriam. D.** (1997). Investigaciones geofísicas de la zona A de Cayo Largo del Sur.
30. - **Segura. R.** Introducción a la Petrografía, año 1985.
31. - **Valdés. A.** (1984). Evaluación de los recursos de las aguas subterráneas dulces en Cayo Largo.
32. - **Varios autores.** (del año 1986 al año 1996). Epistolario de Cayo Largo del Sur.



Foto 1. Mareógrafo instalado en el puerto de Cayo Largo del Sur para estudiar la influencia de las mareas oceánicas en el acuífero y su relación con los niveles dinámicos en las captaciones de agua dulce.



Foto 2. Arenas oolíticas típicas de Cayo Largo del Sur. En el corte se puede observar en la parte inferior, las arenas oolíticas masivas; en la parte central, las arenas oolíticas finamente estratificadas, y en la parte superior, las mismas arenas oolíticas con estratificación cruzada y la presencia del carso.



Foto 3. Trinchera o zanja de captación (T-13), la que se construyó paralelamente a las estructuras geológicas y perpendicular al flujo de las aguas subterráneas, extrañéndose agua dulce.

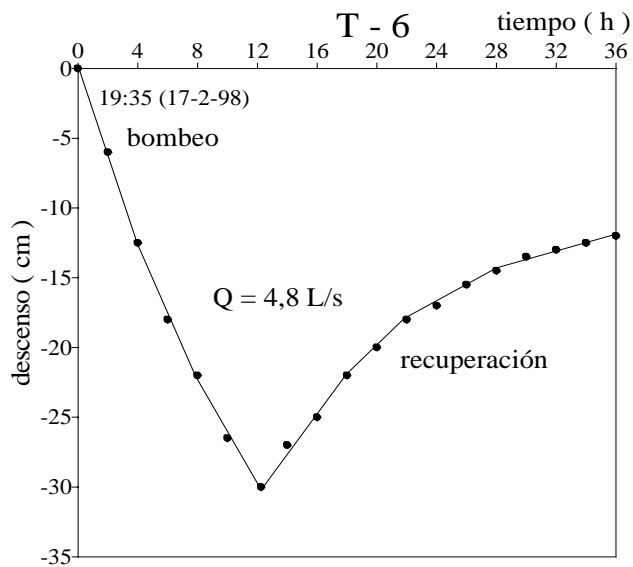


Fig. 1. Tipos de captación de las aguas subterráneas dulces utilizadas para el abasto de agua dulce en Cayo Largo del Sur.

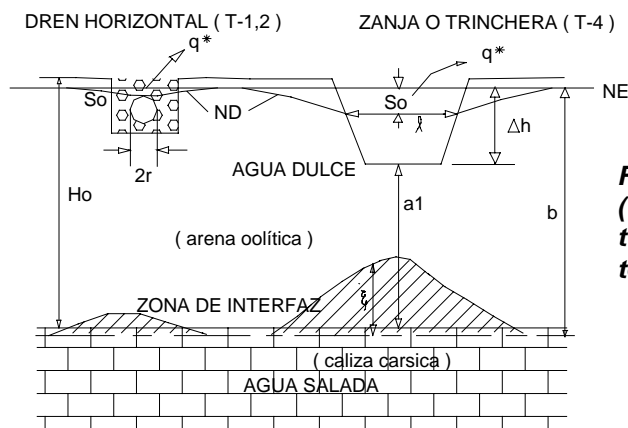


Fig. 2. Trinchera o zanja de captación de captación (T-6), construida perpendicularmente a las estructuras geológicas y paralela a las líneas de flujo subterráneo, con un largo tiempo de recuperación.

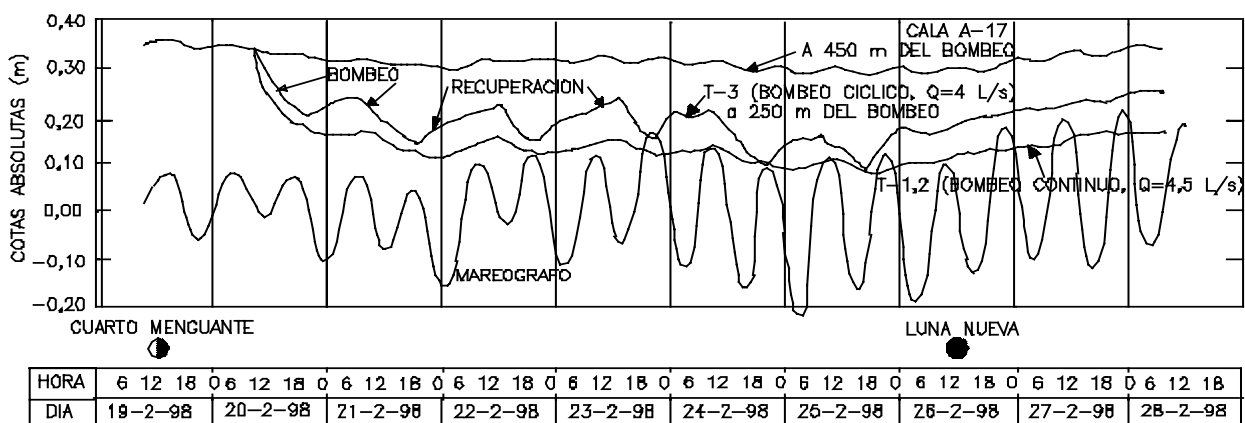


Fig. 4. Prueba de caudal en el sistema de captación de las aguas subterráneas T-1,2-T-3 soterrado), como se puede apreciar con un largo período de extracción se produce la estabiliz de los niveles dinámicos, extrayéndose aguas dulces.

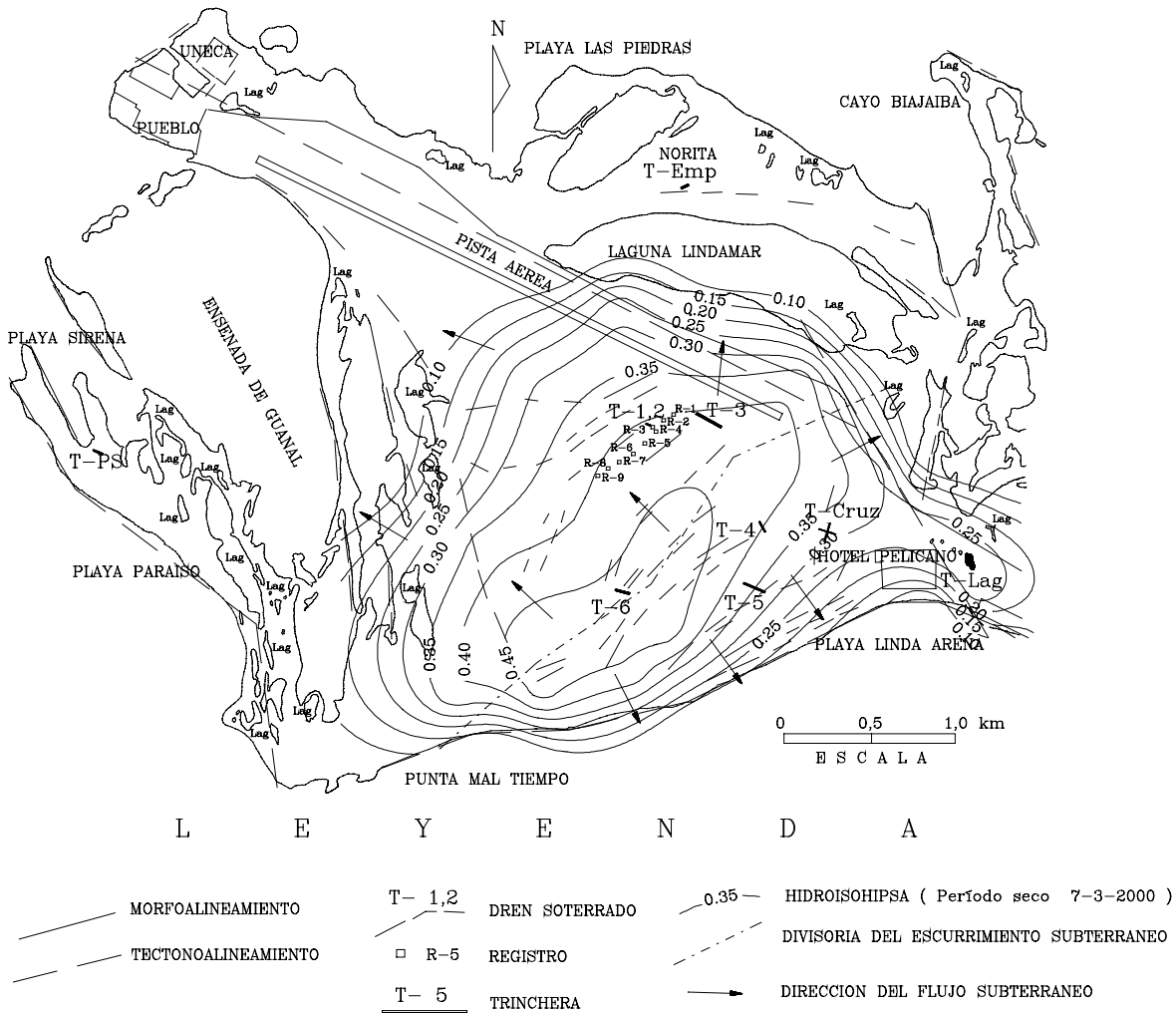


Fig. 3. Esquema hidrogeológico de la zona "A" de Cayo Largo del Sur, con la situación de las captaciones construidas. Como se puede ver, la mayoría de las trincheras se encuentran con una orientación perpendicular a los morfoalineamientos y a las hidrohisohipsas.

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS ACUÍFEROS PROFUNDOS DEL SISTEMA HIDROTHERMAL SAN DIEGO DE LOS BAÑOS - BERMEJALES

Juan. R. Fagundo Castillo, Patricia González Hernández, Margaret Suárez Muñoz, Luis Sánchez Rodríguez, Boris Peña Forte.

Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina" Ave: 243 #19815 Rpto: Fontanar Boyeros. Ciudad de la Habana, Cuba. Correo electrónico: termalis@infomed.sld.cu .

RESUMEN

Aplicando en forma sucesiva, geotermómetros químicos cuantitativos basados en las concentraciones de sílice y proporciones de sodio, potasio, calcio y litio, fueron estimadas las temperaturas de los acuíferos profundos del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales. De acuerdo al modelo geotérmico determinado en este sistema mediante los métodos señalados y tomando en consideración el gradiente geotérmico local, se estimó que las aguas alcanzan temperaturas entre 57 y 127 °C a 560 m de profundidad (sectores hidrogeológicos de San Diego de los Baños y Bermejales) y entre 90 y 127 °C a 1200 m de profundidad (sector hidrogeológico San Diego de los Baños).

ABSTRACT

Quantitative chemical geothermometers, based on the concentrations of silica and proportions of sodium, potassium, calcium and lithium in water from hot springs, have been used successfully to estimate the temperature of the reservoir rocks at San Diego de los Baños-Bermejales hydrothermal system. According to the geothermal model determined by means of these methods and taking into account the local geothermic gradient, the waters of this system reach temperatures from 57 to 127 °C at 560 m deep (San Diego de los Baños and Bermejales hydrogeological sectors) and temperatures from 90 to 127 °C at 1200 m deep (San Diego de los Baños hydrogeological sector).

INTRODUCCION

La termometría geoquímica ha sido ampliamente utilizada para caracterizar aguas mineromedicinales y manifestaciones termales en general (Cerón et al., 1993; Hussein et al., 1994). La misma constituye una herramienta que permite conocer la temperatura a la que se encuentra el fluido termal en profundidad. A partir de los geotermómetros es posible estimar la temperatura en la cual se establecen los equilibrios termodinámicos entre el agua y la roca en el acuífero o reservorio termal base.

En este trabajo se hace un breve resumen de los fundamentos de estos métodos, y se presentan las principales ecuaciones propuestas. Un conocimiento más completo puede adquirirse a partir de otros trabajos más especializados: Fournier (1977), Urbani. (1991), Morell (1995).

Otro objetivo del trabajo es mostrar la aplicación de la termometría geoquímica en un yacimiento de aguas mineromedicinales, siendo seleccionado para esto, el sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejales por ser uno de los más importantes de Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos hidroquímicos utilizados corresponden a muestreos realizados entre 1987- 1990 por Peláez et al (1990), así como a muestreos más recientes realizados por los autores del trabajo. Los análisis químicos de las primeras muestras fueron realizados en el laboratorio LACEMI (MINBAS), mientras que los últimos, en la Universidad de Huelva (España) mediante ICP-Masas.



Los cálculos de las temperaturas de los acuíferos profundos fueron realizados mediante los algoritmos contenidos en el sistema informático HIDROWIN. Mediante este software fueron determinados además los estados de equilibrios las aguas respecto al cuarzo, la calcedonia, la calcita, el aragonito y el yeso.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS GEOTERMÓMETROS UTILIZADOS

Geotermómetros de SiO₂. Se basan en la solubilidad de la sílice en función de la temperatura para valores de pH comprendidos entre 2 y 9.3. Las aguas termales emergen a la superficie sobresaturadas en sílice a la temperatura de la emergencia y equilibradas con su temperatura original en el reservorio. Para su aplicación es necesario determinar la fase silicea de la cual procede el SiO₂ y que forma parte de la constitución del agua. La base de estos geotermómetros es la reacción:



Cuarzo, Calcedonia, etc.

La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{A}{B + p \log C} - 273.15 \quad (1)$$

Donde A y B toman los valores que se expresan en la tabla 1 (Fournier, 1977).

Tabla 1. Valores de A y B en la expresión 1

Mineral	A	B
Sílice amorfa	731	4.52
Cristobalita β	781	4.51
Cristobalita α	1000	4.78
Calcedonia	1032	4.69
Cuarzo (cond.)*	1309	5.19
Cuarzo (ebull.）**	1522	5.75

* Con enfriamiento conductivo, sin pérdida de vapor

** Con enfriamiento por ebullición, máxima pérdida de vapor

p = -1; C: Concentración de SiO₂ en agua (mg/l)

Otros autores han propuesto unos coeficientes ligeramente diferentes, pero cuyos resultados difieren muy poco de los formulados en la tabla 1 (Michard, 1979).

Fournier y Potter (1982) propusieron una nueva ecuación que describe la curva de solubilidad del cuarzo, señalando que es superior a las anteriores en el intervalo de 30 a 320 °C:

$$T (^{\circ}\text{C}) = -42.198 + 0.28831 C - 3.6686 \cdot 10^{-4} C^2 + 3.1665 \cdot 10^{-7} C^3 + 77.034 \log (C)$$

Para las aguas con pH elevados (> 9) se debe corregir el contenido de SiO₂ medido debido a los efectos de disolución.

Geotermómetro de Na-K. Se basa en ecuaciones empíricas que correlacionan datos químicos y temperaturas reales de reservorios geotérmicos alcanzados por los pozos, siendo las ecuaciones más utilizadas las de Fournier (1979), para T > 250 oC y las de Truesdell (1976) para T < 156 oC. La fórmula del geotermómetro Na-K es similar a (1), donde:

	A	B
Fournier (1979)	127.6	1.483
Truesdell (1976)	855.6	0.8573

C: Concentración de (Na/K) en agua (mg/l), P = +1

Este método está menos afectado por la mezcla del agua termal con las aguas frías superficiales, pero los resultados obtenidos difieren en ocasiones con la realidad (Urbani, 1991). Esto ha dado lugar a que se desarrollara el geotermómetro Na-K-Ca.

Geotermómetro Na-K-Ca. Es más confiable para temperaturas menores de 156 °C donde falla el de Na-K. El método no es sensible a la dilución por mezcla de aguas. No obstante el geotermómetro Na-K-Ca puede dar errores debido a una reacción ulterior del agua con los minerales a temperaturas inferiores a la del reservorio de más alta temperatura o a precipitación de CaCO_3 . En el primer caso se pueden estimar temperaturas muy bajas debido a un incremento del contenido de Ca^{2+} , mientras que en el segundo caso puede dar por resultado una temperatura mucho más elevada. La fórmula de este geotermómetro es similar a (1), donde:

$$A = 1647; B = \log \frac{(Na)}{(K)}, C = \log \frac{(\sqrt{Ca})}{(Na)}$$

Las concentraciones se expresan en moles: $(Na) = \frac{ppmNa}{22991}$; $(K) = \frac{ppmK}{39102}$; $(Ca) = \frac{ppmCa}{40080}$

$$P = \frac{4}{3} \text{ si } \log \frac{(\sqrt{Ca})}{(Na)} \geq 1; \text{ y la temperatura del reservorio } < 100^\circ\text{C}$$

$$P = \frac{1}{3} \text{ si } \log \frac{(\sqrt{Ca})}{(Na)} \leq 1; \text{ y la temperatura del reservorio } > 100^\circ\text{C}$$

Benjamin et al. (1983) propuso algunas modificaciones a este geotermómetro, tomando en cuenta datos experimentales con minerales de bajas temperaturas como zeolitas y arcillas.

Para temperaturas menores de 100 °C, $A = 2200$ y $p = -6.3$

Para temperaturas mayores de 100 °C, $A = 1416$ y $p = 0.055$

Geotermómetro Na-K-Ca-Mg. Este geotermómetro fue diseñado por Fournier y Potter (1979) para corregir las temperaturas estimadas por el de Na-K-Ca en los casos en que $T > 70^\circ\text{C}$ y $R < 50$, donde:

$$R = \frac{Mg}{(Mg + Ca + K)} 100$$

Según Urbani (1991), esta corrección no ha sido muy utilizada, por lo que no hay suficiente confiabilidad para una aplicación generalizada. Fournier sugiere que se debe aplicar la corrección si el agua realmente procede de un reservorio cuya temperatura sea menor de 100 °C, pero si es mayor de esa temperatura y el agua en su camino a la superficie obtiene mayor cantidad de magnesio, este tipo de corrección originará valores muy bajos.

Geotermómetro Na-Li y Li. Según Fouillac y Michard (1981), para temperaturas del reservorio menores de 100 °C, estos geotermómetros deben ser mejores que los anteriores, pero debe haber suficiente contenido de Li en la muestra y el método analítico empleado deberá tener la suficiente sensibilidad. Para contenidos de $\text{Cl}^- < 7000 \text{ ppm}$, los coeficientes de (1) adquieren los siguientes valores:

$$\text{a) } C = \log \frac{(Na)}{(Li)}; A = 1000, B = 0.38; p = +1$$

$$\text{b) } C = \log (Li); A = 2258, B = 1.44; p = +1$$

Las concentraciones se expresan en moles:

$$(Na) = \frac{ppmNa}{22991}; (Li) = \frac{ppmLi}{6939}$$



Los resultados obtenidos por este geotermómetro pueden afectarse considerablemente por mezcla de aguas. En esos casos se comete menos error utilizando la relación Na/Li.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLOGICAS

El Balneario San Diego de los Baños se encuentra ubicado junto al pueblo del mismo nombre, municipio Palacios, provincia de Pinar del Río (Cuba), en las coordenadas N 315 037 E 256 008. Comprende tres manantiales fundamentales: El Tigre, El Templado y La Gallina, los cuales brotan en el cauce del río San Diego de los Baños. A unos 7 Km aguas arriba alumbran, en el propio cauce, varios manantiales denominados M1, M2, M3, M4 y M5 (coordenadas N 318 351 E 250 468). Todas estas manifestaciones termales están asociadas a las fallas Pinar y San Diego de los Baños. La primera falla separa las zonas estructuro-faciales Guaniguanico y San Diego de los Baños, mientras que la segunda falla separa las dos subzonas en que se divide la unidad tectónica Guaniguanico (Sierra de los Órganos y Sierra del Rosario).

La geología de la Sierra del Rosario, que alimenta los manantiales del yacimiento objeto de estudio, se caracteriza por una complejidad litológica y estructural, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (Pszczoiowski, 1978; Academia de Ciencias, 1987). Los sedimentos carbonatados acuíferos de la Fm. Artemisa (Jurásico-Superior Cretácico-Inferior) se encuentran intercalados con sedimentos impermeables de tipo efusivo sedimentario, ultrabásico y esquisto arenoso pizarroso de la Fm. San Cayetano (Jurásico Superior). Esta disposición estructural condiciona la formación de un relieve cársico (cokpitkarst), diferente a la de la Sierra de los Órganos, donde es más típica la morfología de mogotes (karren karst).

Desde el punto de vista hidrogeológico se pueden distinguir varios sistemas de acuíferos: a) Complejo acuífero de las rocas efusivo-sedimentarias (Cretácico); b) Complejo acuífero asociado a las rocas ultrabásicas, c) Complejo acuífero asociado a materiales terrígeno- carbonatados del Paleógeno; d) Sistema acuífero desarrollado de las calizas del Cretácico; e) Zona de las aguas minerales y f) Complejos acuíferos asociados a las pizarras y esquistos arcillo arenosos (Jurásico- Cretácico). Las características de estas unidades son las siguientes:

- a) El complejo de rocas terrígenas de tipo efusivo sedimentarias se encuentra localizado en la parte Norte de la Sierra del Rosario y no guarda relación hidráulica con las aguas minerales estudiadas. En este complejo de rocas se originan cursos superficiales y acuíferos cuyas aguas son del tipo bicarbonatadas sódicas o cálcicas sódicas con mineralización entre 0.5 y 1 g/l. Está constituido por aleurolitas, argilitas, areniscas, lavas basálticas andesíticas, calizas y margas de las formaciones Vía Blanca y Encrucijada.
- b) El complejo de rocas ultrabásicas está compuesto por serpentinitas, harzburgitas y otras rocas serpentinizadas de edad Cretácico. Originan corrientes superficiales y acuíferos en fisura, cuyas aguas son del tipo bicarbonatadas magnesianas con mineralización del orden de 300 mg/l. Estas rocas están distribuidas por toda la Sierra del Rosario, aunque el macizo de mayor elevación se encuentra en la vertiente Norte, sin conexión aparente con las aguas minerales de San Diego de los Baños.
- c) El complejo de rocas terrígenos carbonatadas del Paleógeno, por sus características poco permeable y por encontrarse intercaladas entre las calizas, constituyen parte-aguas de las cuencas hidrográficas y vías de conducción autóctonas de cursos superficiales de los sistemas cársicos. No forman sistemas de acuíferos importantes.
- d) El complejo de calizas del Cretácico está representado principalmente por calizas masivas
- e) organógenas (formaciones Guajaibón y Sierra Azul) y calizas de estratos finos (formación Artemisa). También forman parte de este complejo calcarenitas, aleurolitas y otras rocas. Las aguas de esta unidad hidrogeológica son del tipo bicarbonatadas cálcicas con mineralización que oscila entre 0.3 a 0.6 mg/l en dependencia de las características texturales de la roca o del contenido de CO₂ y del tiempo de contacto entre el agua y las calizas.

- f) Las aguas minerales están asociadas a las rocas de la Fm. Artemisa. Constituyen el drenaje profundo del carso, desarrollado por lo general, en condiciones de confinamiento entre secuencias impermeables.
- g) Las secuencias de la formación San Cayetano (edad Jurásico), constituidas por esquistos, pizarras y areniscas, forman parte de las capas impermeables de los yacimientos de aguas minerales. La formación San Cayetano está representada en el área de estudio por areniscas cuarzosas con intercalaciones de aleurolitas, y con escasas intercalaciones de calizas. Estas rocas presentan la composición que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Composición de los constituyentes presentes en las rocas de la Fm. San Cayetano muestreadas durante los trabajos geológicos efectuados por Peláez et al. (1990).

Tipo de roca	Constituyente	Composición (%)
Areniscas	Granos de cuarzo	60-75
	Plagioclasas	2-5
	Moscovita	1-2
	Turmalina y clorita	1
	Sericita	< 1
Aleurolitas	Cuarzo	65-70
	Plagioclasas	3
	Moscovita	1-2
	Fragmentos de roca silícica	< 1
	Turmalina	< 1
	Sustancias carbonosas	< 1

La formación Artemisa (miembro Zaza) fue cortada, en los trabajos de búsqueda detallada, llevados a cabo en el área por Peláez et al. (1990), por los pozos 1, 3, 16 y 17. Está constituida por calizas de estratificación fina que poseen venas de calcita e intercalaciones de aleurolita. El miembro Sumidero de la Fm. Artemisa presenta calizas fértidas de granos muy finos con estratificación de media a gruesa, con venas de calcita e intercalaciones de pedernal.

La presencia de la Fm. Cascarajícara es limitada en el área de estudio. Ocurre en forma de brechas calcáreas, constituidas por fragmentos de pedernales y calizas unidas por un cemento calcáreo.

La formación Manacas se encuentra igualmente distribuida tanto al Norte como al Sur de la zona de estudio. Está representada por aleurolitas, arenas cuarzosas y fragmentos de calizas y aleurolitas.

La zona estructural facial San Diego de los Baños está representada en el área por afloramientos de areniscas y aleurolitas de la Formación Capdevila.

Los estudios geofísicos y geológicos de pozos arrojaron los siguientes resultados:

El pozo 1 cortó fundamentalmente calizas de la Fm. Artemisa hasta los 344 m. Las aguas del tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ aparecieron desde los 80 m de profundidad. Mediante estos estudios fueron detectadas cinco zonas u horizontes acuíferos (Tab. 3).

Tabla 3. Horizontes acuíferos que cortó el pozo 1 durante los trabajos de búsqueda desarrollados por Peláez et al. (1993).

Horizonte acuífero	Tipo de agua	T (°C)
0-60	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	30
60-120	$\text{SO}_4\text{-Ca}$	31



120-200	SO ₄ -Ca	40
200-280	SO ₄ -Ca	43
280-300	SO ₄ -Ca	46

El pozo 2 comienza en la Fm. San Cayetano, a partir de 88 m corta los depósitos de la Fm. Artemisa, extendiéndose hasta el final del pozo con excepción de una capa de esquistos ubicada al terminar el corte. El pozo 3 corta primero la Fm. San Cayetano, luego una brecha tectónica y más tarde la Fm. Artemisa. El pozo 4 corta la Fm. Artemisa al principio y al final, mientras que centralmente se localizan los depósitos de la Fm. San Cayetano. El contacto superior entre San Cayetano y Artemisa es transicional, mientras que el contacto inferior es brusco, determinado al parecer por una brecha tectónica y rocas serpentínicas que se localizan entre los 194-213 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICO-FÍSICAS DE LOS MANANTIALES

En la tabla 4 se expone un resumen de las principales características químico físicas de las aguas mineromedicinales de los manantiales de San Diego de los Baños y Bermejales.

Tabla 4. Propiedades químico físicas de las aguas mineromedicinales muestreadas en los manantiales de San Diego de los Baños y Bermejales.

Manantial	Sector hidrogeológico	T (°C)	pH	TSS (mg/l)	H ₂ SiO ₃ (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Rn (mμc/l)
1	S.D.	36.0	6.91	2046	28.6	45.0	1.50		341.0	2.07	1.0
2	S.D.	36.5		1506	24.5	34.5	1.64	0.02	348.7	38.8	1.0
3	S.D.	31.0	6.85	2160	47.6	19.3	2.50		345.0	19.0	0.93
4	S.D.	36.0	6.95	3174	32.5	25.0	2.00		516.0	69.0	1.2
5	S.D.	36.2		2110	28.4	29.0	2.00	0.05	529.0	50.9	1.2
6	B.	31.0	6.95	3283	26.0	25.0	2.75		464.0	96.0	0.23
7	B.	31.5	7.50	2884	27.0	51.0	2.50		442.0	102.0	0.24
8	B.	32.0	6.80	2788	32.5	25.0	2.50		448.0	111.0	0.22
9	B.	31.0	7.00	2884	26.0	25.0	2.50		381.0	153.0	0.22

S:D: San Diego de los Baños; B: Bermejales. Manantiales: El Templado (1-2); El Tigre (3); La Gallina (4-5); M1 (6); M3 (7); M4 (8); M5 (9).

Del análisis de la tabla 4 se pueden establecer las siguientes regularidades:

Los manantiales del sector hidrogeológico San Diego de los Baños presentan, por lo general, valores superiores de temperatura y contenido de Rn a los de los manantiales del sector Bermejales. Por el contrario, en los manantiales de Bermejales resultan mayores los valores de pH; mineralización (en términos de TSS) y los contenidos de H₂S, H₂SiO₃, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ y SO₄²⁻ que en los manantiales de San Diego de los Baños. Los contenidos de HCO₃⁻ Na⁺ son más o menos similares en los manantiales de ambos sectores. Las aguas en su conjunto son de los tipos SO₄ - Ca y SO₄ > HCO₃ - Ca.

EQUILIBRIOS TERMODIÁMICOS

En la tabla 5 se muestra el estado en que se encuentran las aguas muestreadas en superficie con respecto a diferentes minerales. Estos resultados ponen de manifiesto que las aguas de los manantiales de San Diego de los Baños y Bermejales tienden a encontrarse cerca de la saturación con respecto a la



calcedonia, sobresaturados con respecto al cuarzo, la calcita y la dolomita, e insaturadas con respecto al yeso y a la anhidrita.

Tabla 5. Valores de los índices de saturación (IS) con respecto a los minerales cuarzo, calcedonia, calcita, dolomita, yeso y anhidrita de las aguas mineromedicinales de San Diego de los Baños y Bermejales.

Manantial	Sector hidrogeológico	IS					
		Cuarzo	Calcedonia	Calcita	Dolomita	Yeso	Anhidrita
El Templado	S.D.	0.32	- 0.07	0.62	0.55	- 0.49	- 0.64
El Tigre	S.D.	0.33	- 0.08	0.61	0.40	- 0.46	- 0.64
La Gallina	S.D.	0.42	0.02	0.87	0.84	- 0.23	- 0.39
M 1	B.	0.51	0.10	0.56	0.36	- 0.17	- 0.36
M 3	B.	0.60	0.19	1.07	1.40	- 0.19	- 0.38
M 4	B.	0.54	0.13	1.16	1.59	- 0.20	- 0.38
M 5	B.	0.37	- 0.04	1.06	1.40	- 0.20	- 0.39

RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS GEOTERMOMÉTRICOS

En la tabla 6 se presentan los resultados de los cálculos realizados con un grupo de geotermómetros cuantitativos: SiO_2 , Na-K, Na-K-Ca, Na-Li, Na-K-Ca-Mg. En ella puede apreciarse que los geotermómetros a base de SiO_2 cristobalita α y calcedonia dan temperaturas del reservorio profundo inferiores a la temperatura del manantial y los geotermómetros de SiO_2 amorfo y cristobalita β dan temperaturas por debajo de cero, lo cual es totalmente absurdo. Los resultados obtenidos por estos métodos indican que no son esas fases las que se encuentran en equilibrio con el reservorio. Los resultados utilizando SiO_2 a base de cuarzo dan valores aceptables, aunque debe destacarse que este método se afecta sensiblemente cuando existen mezclas de aguas, siendo eficiente para determinar la temperatura del último equilibrio del agua con los minerales de SiO_2 del medio ambiente. En el caso en que existan mezclas, la temperatura estimada será por tanto inferior a la del acuífero más profundo.

Los resultados obtenidos por el método Na- K también dan valores muy bajos, por lo que debe desecharse por razones similares. A pesar de que este método se afecta menos por la mezcla de aguas, como se ha señalado con anterioridad, las estimaciones difieren en ocasiones con la realidad (Urbani, 1991).

Los geotermómetros a base de Li se consideran más confiables que otros para temperaturas inferiores a 100 °C. Sin embargo, las estimaciones pueden afectarse en caso de mezcla. Los resultados obtenidos mediante el geotermómetro Na- K (Tab. 6) son muy bajos, lo cual pudiera atribuirse al poco contenido de Li en las muestras.

Sin embargo, los resultados de los cálculos mediante el geotermómetro Na-Li parecen más confiables y pudieran ser tomados en cuenta en esta discusión. Estos valores son relativamente más altos que los determinados por los geotermómetros de SiO_2 (cuarzo). En el caso del método de Na-Li para Cl⁻ menor de 1000 °C, el valor obtenido para el manantial El Templado resultó ser demasiado bajo. De todos modos, sólo dos muestras poseen contenidos de Li, por lo que, de todas formas, resultan insuficientes los resultados obtenidos mediante los geotermómetros a base de este elemento.

Los cálculos efectuados con los geotermómetros Na-K y Na-K-Ca arrojan, por lo general, valores de temperatura base más elevados que los calculados por el método de SiO_2 (cuarzo), mientras que el geotermómetro Na-K-Ca-Mg brinda estimaciones más cercanas a la del cuarzo. La experiencia mundial es que este último método da buenos resultado para reservorios con temperaturas entre 150 y 200 °C,

pero casi siempre da valores más elevados que los reales para reservorios con temperaturas menores (Urbani, 1991).

Tabla 6. Valores de las temperaturas (°C) de los acuíferos básicos que alimentan los manantiales de San Diego de los Baños y Bermejales, determinadas mediante diferentes geotermómetros

No.	SiO ₂ amorfo	SiO ₂ cristobalita α	SiO ₂ cristobalita β	SiO ₂ calcedonia	SiO ₂ curazo	SiO ₂ cuarzo vapor	Na K-	Na-Li	Na-Li, Cl< 1000	Na-K	Na-K-Ca	Na-K-Ca-Mg
1	- 48	12	- 32	29	61	67	18	123	50	111	102	99
2	- 43	18	- 27	35	67	72	19			84	- 6	
3	- 26	38	- 8	57	88	90	31			206	135	127
4	- 43	17	- 27	35	67	72	19	176	108	144	111	104
5	- 39	22	- 22	40	72	77	16			159	115	90
6	- 46	14	- 30	31	63	69	19			195	129	67
7	- 45	16	- 29	33	65	70	17			113	107	65
8	- 39	22	- 22	40	72	77	16			184	126	58
9	- 46	14	- 30	31	63	69	13			182	126	35

Manantiales: El Templado (1, 2), El Tigre (3), La Gallina (4, 5), M1 (6), M3, (7) M4 (8), M5 (9).

Por el método geotermométrico Na-K-Ca-Mg, el cual se recomienda para corregir las estimaciones del método Na-K-Ca cuando $T > 70^{\circ}\text{C}$ y $R < 50$, da temperaturas del mismo orden o ligeramente más altas o más bajas que las calculadas por el método de SiO₂ (cuarzo).

Como resultado del análisis de las ventajas y limitaciones de los diferentes geotermómetros y a partir de los valores más concordantes obtenidos, se pueden seleccionar como resultados más confiables los que se exponen en la tabla 7.

MODELO GEOTÉRMICO

Del análisis de la tabla 7 se infieren que las aguas que alimentan los manantiales San Diego de los Baños (El Templado, El Tigre y La Gallina), alcanzan en la base temperaturas del orden de 90-127 °C y en su ascenso se mezclan con otras más superficiales, alcanzando en el reservorio más cercano, entre 61 y 90 °C. Las aguas de los manantiales Bermejales alcanzan temperaturas más bajas en el reservorio (63-77 °C) y ascienden hasta la superficie sin mezclarse.

Tabla 7. Resultados más aceptables de las temperaturas de los acuíferos profundos que alimentan los manantiales de San Diego de los Baños y Bermejales

Manantial	Temperaturas (°C)			
	Na-K-Ca-Mg	SiO ₂	R ₁	R ₂
El Templado	99	61-67	90-127	61-90
El Tigre	127	88-90		
La Gallina	90-104	67-77		
M 1	67	63-69		63-77
M 3	65	65-70		



M 4	58	72-77		
M 5	35	63-69		

R₁: Reservorio más profundo; R₂: Reservorio más superficial

Los resultados obtenidos son coherentes con el hecho de que las aguas de los manantiales El Templado y El Tigre (San Diego de los Baños) poseen menor mineralización y en las emergencias y son del tipo SO₄ > HCO₃ – Ca, lo cual pudiera atribuirse a una mezcla entre aguas del tipo SO₄–Ca, propias de las capas profundas de la Fm. Artemisa, en la zona de falla, con aguas del tipo HCO₃–Na de la Fm. San Cayetano. Las aguas de los manantiales de Bermejales, por el contrario, poseen mayor mineralización y son del tipo SO₄–Ca. Por último, el contenido de Rn, alrededor de cinco veces mayor en San Diego de los Baños que en Bermejales indica, en el primer caso, que las aguas poseen un tiempo mayor de contacto con las rocas del medio geológico.

Conociendo en gradiente geotérmico de una región, la temperatura de los acuíferos profundos (Tr) y la temperatura del agua en la superficie (Ts) , es posible estimar la profundidad de los reservorios (Px) a la cual descienden las aguas de infiltración mediante la expresión:

$$\frac{4^{\circ}\text{C}}{100\text{m}} = \frac{T_r - T_s}{P_x}$$

El flujo de calor desde el interior hacia la corteza terrestre es anormalmente elevado, del orden de 15-30 °C, en áreas asociadas a procesos de extensión o separación de placas, de choque de placas (subducción) y de actividad distensiva dentro de una placa, donde existen fenómenos geológicos notables: actividad sísmica elevada, orogenia con formación de cordilleras en épocas geológicas recientes y actividad volcánica notable (Morell, 1995). En esas regiones el gradiente geotérmico alcanza valores entre 15-30 °C por cada 100 m. Otros procesos que pueden generar calor son, por ejemplo: fricción mecánica entre los labios de fallas y disipación de calor debido a una intrusión magmática. Por otro lado, en zonas caracterizadas por su estabilidad tectónica, donde el flujo de calor bajo, el gradiente geotérmico puede variar entre 2-4 °C.

Tomando en consideración las mediciones de temperatura efectuadas por Peláez et al. (1990) en un perfil de pozos, a diferentes profundidades, se puede establecer que el gradiente geotérmico en la región estudiada es del orden de 6 °C por cada 100 m.

En la tabla 8 se muestran los resultados de los cálculos de la profundidad alcanzada por las aguas, realizados bajo las premisas anteriormente señaladas.

Tabla 8. Estimación de la profundidad alcanzada por las aguas en los reservorios que alimentan los manantiales de San Diego de los Baños y Bermejales

Manantiales	Profundidad (m)	
	R ₁	R ₂
San Diego de los Baños	1208	658
Bermejales		567

CONCLUSIONES

Sobre la base de un gradiente geotérmico de 6 °C por cada 100 m de profundidad, estimado a partir de los estudios hidrogeológicos realizados con anterioridad, en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejales, y las determinaciones geotermométricas realizadas a partir de los datos hidroquímicos correspondientes a los principales manantiales mineromedicinales de la región, se estableció el modelo geotérmico. Mediante el mismo se infiere que las aguas de infiltración en el macizo



descienden aproximadamente 1.2 y 0.6 km hasta alcanzar los reservorios profundos. Las aguas que alimentan los manantiales de San Diego de los Baños, se mezclan con otras aguas más superficiales en un acuífero ubicado a 0.7 Km aproximadamente, alcanzando temperaturas medias de 108 y 75 °C en los niveles más profundo y somero respectivamente. En este último, las aguas originales asociadas a la Fm. Artemisa, del tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y con elevada mineralización, se mezclan con aguas del tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, asociadas a la Fm. San Cayetano, obteniéndose un agua de menor mineralización del tipo $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 - \text{Ca}$. El mayor contenido de Rn en las aguas de San Diego de los Baños con relación a las de Bermejales indica que las primeras tienen un mayor tiempo de contacto con las rocas del medio geológico, lo cual es concordante también con el modelo geotérmico establecido.

BIBLIOGRAFIA

Academia de Ciencias de Cuba (1988). Mapa Geológico de Cuba. Escala 1:250 000.

Benjamín, T., R. Charles and R. Vidale (1983). Thermodynamic parameters and experimental data for the Na-K-Ca geothermometer. *Jour. Volc. Geother. Res.*, 15: 157-186.

Cerón, J.C., A. Pulido-Bosh y A. Padilla (1993). Caracterización hidroquímica y análisis de los estados de equilibrio termodinámico en aguas termominerales de Alhama de Murcia (Murcia, España). *Estudios Geol.*, 49: 49-61.

Fournier, R.O. (1977). Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5 (1-4): 41-50.

Fournier, R.O. (1979). Geothermal and hydrologic considerations and the use of enthalpy-enthalpy diagrams in the precipitation of underground conditions in hot-springs systems. *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, 5: 1-16.

Fouillac, C. and G. Michard (1981). Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal systems. *Geothermic*, 10:55-70.

Fournier, R.O. and R. Potter (1979). Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer, *Geochem. Cosmochem. Acta*. 43: 1543-1550.

Fournier, R.O. and R. Potter, (1982). A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bull.*, nov. 1982: 3-12.

Hussein, M.T, A. G. Bazuhair and M. Hamza (1994). Thermal springs in Jizn and Al-Lith area, Saudi Arabia. *Publicaciones New Actualités. Int. Soc. Of Hydrothermal Technics*. No. 3: 36-41.

Michard, G. (1979). Geothermomètres chimiques. *Bulletin du B.R.G.M., Section III* (2): 123-189.

Morell, I. (1995). Origen del termalismo. *Geotermómetros. Algunas peculiaridades hidroquímicas de las aguas termales. III Jornada sobre Termalismo. Santa Clara (Cuba), Nov. 1995*, 19 pp.

Peláez, R., M.C. Olivares, R. Núñez y M. Valdivia (1990). Informe para la búsqueda detallada – Exploración orientativa de las aguas mineromedicinales de San Diego – Bermejales. *Unión de Geología, Pinar del Río*, 159 pp.

Pszczokowski, A. (1978). Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaniguanico in Western Cuba, their lithostratigraphy, facies development and paleogeography. *Acta Geologica Polonica*, 28 (1): 1-96.

Truesdell, A.H. (1976). GEOTHERMS, a geothermometric computer program for hot spring systems. *Proc. Second U.H. Symp. On the Development*.

Urbani, .F. (1991). *Geotermia en Venezuela*. Ed.: Escuela de Geología, Minas y Geofísica., Univ. Central de Venezuela, Caracas, 347 pp.



EVALUACION DE COLECTORES ACUIFEROS COMPLEJOS POR METODOS GEOFISICOS DE POZO.

Dra. Rosa María Valcarce Ortega.

Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, Calle 124 s/n, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba. C.Eléct.: rosy@civil.ispjae.edu.cu

RESUMEN

En Cuba, los acuíferos más importantes se encuentran desarrollados en colectores que presentan doble porosidad, llamados también colectores complejos o naturalmente fracturados. Estos colectores presentan porosidad primaria, asociada a la matriz de la roca, y porosidad secundaria, originada posteriormente a la litificación y asociada a la presencia de fracturas, fisuras, cavernas, canales de disolución, etc. Los Métodos Geofísicos de Pozo aportan valiosa información durante las investigaciones hidrogeológicas en estos tipos de colectores y la literatura especializada describe diferentes metodologías de interpretación para ello.

En este trabajo se presentan los resultados de aplicar de forma combinada, la metodología de interpretación desarrollada por Mendoza y Valle (1996) y por Aguilera (1976), sobre registros de pozo convencionales medidos en el acuífero cársico de la Cuenca Septentrional de Matanzas, Cuba. Ello permitió evaluar el coeficiente de cementación, la porosidad total, la porosidad de matriz, la porosidad de flujo y el coeficiente de partición de los colectores. De esta forma fue posible caracterizar adecuadamente el sistema poral de las rocas y evaluar cualitativamente su permeabilidad. Esta información es de gran utilidad, no sólo para la mejor explotación de los acuíferos, sino también para la protección de los mismos, pues la permeabilidad de los colectores es un importante parámetro a tener en cuenta en los estudios de migración de los contaminantes.

En la investigación presentada, por primera vez se reporta la evaluación del coeficiente de partición de Pirson en estudios hidrogeológicos en Cuba, y son validados los resultados a partir de las descripciones de núcleo disponibles.

ABSTRACT.

In Cuba, the most important aquifers are developed in collectors that present double porosity, named complex or naturally fractured collectors. These collectors present primary porosity, associated to matrix, and secondary porosity, associated to fractures, fissures, caverns, breakup channels, etc. The Well Logs Geophysical Methods contribute valuable information during hydrogeological investigations in these collectors and the specialized literature describes different interpretation methodologies for it.

In this work are presented the results obtained applying the interpretation methodology developed by Mendoza and Valle (1996) and by Aguilera (1976), in the karst aquifer of the Matanzas Basin, Cuba. This way it was possible to evaluate the cementation coefficient, total porosity, matrix porosity, flow porosity and partition coefficient of the collectors. It was possible to identify the poral system of the rocks and to evaluate their permeability qualitatively. This information is of great utility for the best aquifer exploitation and the protection of the same ones, because the permeability of the collectors is an important parameter in the studies of pollutants migration.

In this investigation, the evaluation of the partition coefficient of Pirson is reported in hydrogeological studies in Cuba for the first time. It is demonstrated that the obtained results are satisfactory.

Introducción.

La percolación del agua a través de las fracturas en rocas carbonatadas, provoca el desarrollo del carso y permite la formación de muy buenos colectores, con significativa porosidad y permeabilidad debido a la disolución de la matriz rocosa. Este proceso provoca la formación de los llamados colectores complejos, mixtos o fracturado-cavernosos, que poseen porosidad primaria y secundaria. Tal es el caso de los colectores acuíferos más importantes en Cuba.

Desde la década del 50, la literatura especializada reporta la aplicación de métodos geofísicos de pozo para evaluar colectores complejos fundamentalmente en el estudio de yacimientos de petróleo y gas. Las primeras investigaciones demostraban el poder resolutivo de estos métodos para identificar intervalos fracturados, pero no era posible entonces la evaluación cuantitativa de sus propiedades colectoras. Posteriormente, el desarrollo del equipamiento y de las metodologías de interpretación han permitido la mejor evaluación de los llamados colectores complejos o colectores fracturado-cavernosos, lo que actualmente continúa siendo objeto de investigación a nivel mundial.

Para la detección de colectores complejos en el corte geológico, Aguilera (1995) señala la utilidad de los registros de cavernometría, densidad, litho-densidad, mediciones sónicas, televisor acústico, resistividad eléctrica, potencial espontáneo, etc; destacando que ningún registro por sí mismo detecta fracturas y/o cavernas inequívocamente y que para ello se requiere aplicar un complejo de métodos geofísicos de pozo.

Este mismo autor, (Aguilera, 1995), describe diferentes metodologías para la evaluación cuantitativa de colectores complejos a partir de registros geofísicos de pozo convencionales. Hace un análisis de la ecuación presentada por Pirson (1975), la cual considera que la conductividad eléctrica de un colector complejo equivale a la suma de la conductividad de las fracturas (y/o cavernas) y el bloque (o matriz) conectados en paralelo. Aguilera (1976, 1995), trabajando con la ecuación de Pirson y con la ecuación de Archie (1942), logra evaluar el coeficiente de cementación (m), la porosidad total (ϕ), el coeficiente de partición (v) y la porosidad secundaria (ϕ_2).

En el presente trabajo se exponen los fundamentos teóricos de la metodología de interpretación desarrollada por Aguilera (1976, 1995), y los resultados obtenidos al aplicar la misma en dos calas del acuífero cársico de la Cuenca Septentrional de Matanzas, Cuba.

Breve caracterización del área de estudio.

La Cuenca Hidrogeológica Septentrional de la provincia de Matanzas se encuentra desarrollada fundamentalmente en rocas de edad Neógeno (N_1^{1-2}), pertenecientes a la Formación Güines, compuesta por una gran variedad de calizas (coralinas, recrystalizadas, organo-detriticas, organo-relicticas, dolomitizadas, arcillosas). También se describen margas y calcarenitas dentro de las calizas en forma de lentes de poco espesor. Se destaca el alto grado de carsificación que presenta esta formación, lo que la

convierte en un excelente acuífero que almacena los mayores recursos de agua subterránea de la provincia producto de la infiltración de las lluvias caídas en el territorio.

La profundidad del agua subterránea se encuentra entre 2 y 8 metros. Los caudales de aforo oscilan entre 80 y 200 l/s y aún mayores, con abatimientos menores de 1 metro. Los gastos específicos más característicos son de 100 a 200 l/s por metro. Los coeficientes de trasmisividad varían entre 5 000 hasta 100 000 m²/d, siendo 11 000 m²/d como promedio.

El complejo de métodos geofísicos de pozo medidos a escala de profundidad 1:200 fue: cavernometría, gamma natural integral, resistividad aparente con sondas convencionales (potencial y gradiente), neutrón-neutrón calórico y resistividad natural.

Breve Fundamentación Teórica.

Pirson (1975) desarrolló la siguiente ecuación que describe la conductividad eléctrica de un colector complejo 100% saturado con agua, considerando un modelo de doble porosidad conectado en paralelo:

$$\frac{1}{R_{fo}} = \frac{\nu\phi}{R_w} + \frac{1-\nu}{R_o} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

R_{fo} : resistividad eléctrica del sistema compuesto, (matriz y fracturas), 100% saturado de agua.

R_o : resistividad eléctrica de la matriz 100% de agua.

R_w : resistividad del agua que satura al sistema compuesto.

ϕ : porosidad total del sistema compuesto.

ν : coeficiente de partición. Representa la fracción de la porosidad total formada por fracturas. Se define como:

$$\nu = \frac{\phi - \phi_m}{\phi} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

ϕ_m : porosidad de matriz con respecto al volumen del sistema compuesto (volumen de matriz más volumen de fracturas).

La porosidad secundaria, (ϕ_2) con respecto al volumen del sistema compuesto está dada por:

$$\phi_2 = \nu\phi \dots\dots\dots(3)$$

Reagrupando la ecuación (1) resulta:

$$R_{fo} = \frac{R_w R_o}{\nu\phi R_o + (1-\nu)R_w} \dots\dots\dots(4)$$

El factor de formación del sistema compuesto (F_t), está definido como la relación entre la resistividad del sistema 100% saturado de agua (R_{fo}) y la resistividad del agua de formación (R_w). Sustituyendo esta definición en la ecuación (4) se obtiene:



$$F_t = \left[\frac{R_w R_o}{\nu \phi R_o + (1-\nu) R_w} \right] / R_w \dots\dots\dots(5)$$

Esta ecuación es válida para 3 casos diferentes:

Caso 1: Si sólo existe porosidad de matriz, por tanto $\nu = 0$; $F_t = F$. Entonces, sustituyendo en (5) se obtiene:

$$F = \frac{R_o}{R_w} \dots\dots\dots(6)$$

La ecuación (6) no es más que la relación del factor de formación definido en medios intergranulares.

Caso 2: Si sólo existe porosidad de fractura en el colector, por tanto $\nu = 1$. Entonces, sustituyendo en (5) se obtiene:

$$F_t = \frac{R_w R_o}{\phi R_o} / R_w = \frac{1}{\phi} = \frac{1}{\phi^m} \dots\dots\dots(7)$$

El coeficiente de cementación, o también llamado exponente de porosidad (m), inferido en la ecuación (7) es igual a 1; indicando que en medios muy fracturados y/o cavernosos, comunicados, este coeficiente tomará valores aproximadamente iguales a la unidad.

Caso 3: Considera la presencia de porosidad primaria y secundaria en el colector. Entonces, sustituyendo la ecuación de Archie en (5) se puede plantear:

$$F_t = \frac{1}{\nu \phi + \frac{(1-\nu)}{E}} \dots\dots\dots(8)$$

$$\phi^{-m} = \frac{1}{\nu \phi + \frac{(1-\nu)}{\phi_b^{-mb}}} \dots\dots\dots(9)$$

Matemáticamente, el valor de m puede ser obtenido de la ecuación (9) como:

$$m = \frac{\log(\nu \phi + \frac{(1-\nu)}{\phi_b^{-mb}})}{\log \phi} \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

m : exponente de porosidad del sistema compuesto.

m_b : exponente de porosidad del bloque o matriz.

En sentido estricto, estas relaciones son solo válidas para el modelo teórico que asume que la porosidad de fractura y la porosidad de matriz están conectadas en paralelo. Sin embargo, su empleo en la práctica ha permitido obtener resultados razonables.

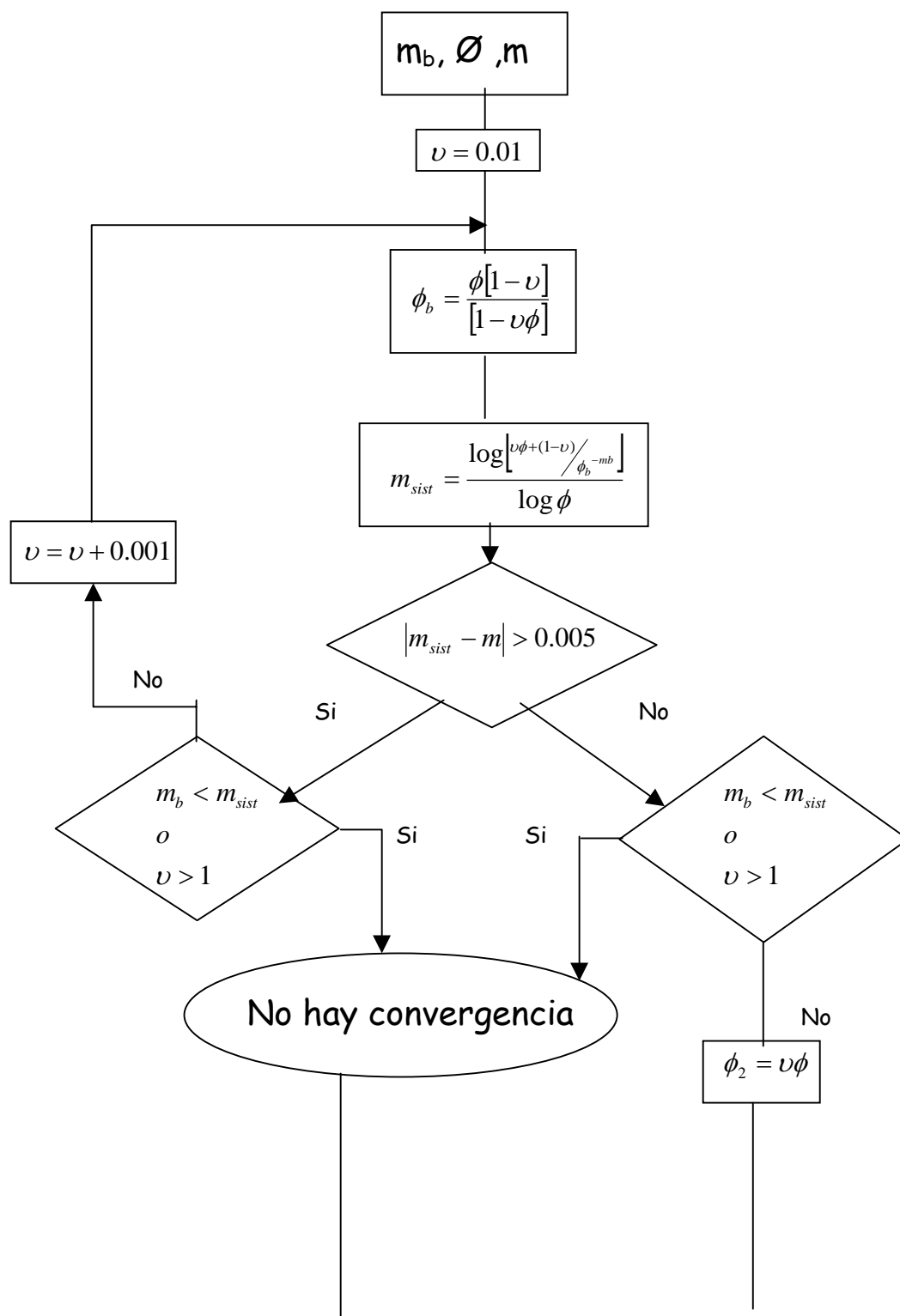
Los valores de m_b y ϕ_b pueden ser obtenidos por datos de laboratorio a partir del análisis de núcleos no fracturados.



En general, en un sistema de doble porosidad conectado en paralelo, se obtienen valores de $m < m_b$.

Valores de $m > m_b$ se presentan en colectores de doble porosidad no conectados (Aguilera, 1995).

Para evaluar ϕ , ϕ_2 y v en colectores complejos se propone el siguiente algoritmo (Castro, 1998).



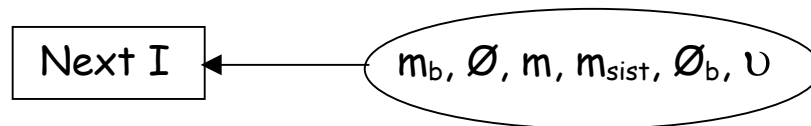


Figura 1. Algoritmo para aplicar la metodología desarrollada por Aguilera (1976, 1995).

Los datos necesarios para aplicar esta metodología, como se observa en la figura anterior, son m_b , ϕ y m . Para medios carbonatados, recomendamos obtener el parámetro m empleando el Gráfico de Abanico desarrollado por Mendoza y Valle (1996), (quienes denominaron a este coeficiente como exponente de flujo o entrapamiento), o empleando el Gráfico Cruzado de Mariposa desarrollado por Gómez-Rivero (1981).

Aplicación en las Investigaciones Hidrogeológicas.

La metodología de interpretación descrita anteriormente fue aplicada en las calas N2 y N13 ubicadas en el Tramo Hidrogeológico Varadero-Cárdenas. Estas calas ya habían sido interpretadas según la metodología de Gómez-Rivero (Valcarce, 1998) y Mendoza y Valle (Valcarce, 1999).

Para aplicar la metodología de Aguilera (1976, 1995), el coeficiente m_b se asumió igual a 2, al no disponerse de ensayos de laboratorio y ser éste el valor más probable reportado en la literatura. La porosidad total fue obtenida a partir de la interpretación del método neutrónico. El coeficiente m se evaluó por el Gráfico de Abanico.

En los colectores clasificados según el Gráfico de Abanico como intergranulares, por razones obvias no fue aplicada la metodología de Aguilera. Tampoco en aquellos intervalos clasificados como arcillosos cavernosos, debido a que en estos casos, los valores de m resultan menores que 1, lo que Mendoza y Valle explican por la presencia de arcilla en las rocas lo cual provoca un incremento considerable de la conductividad eléctrica y valores disminuidos de m .

El algoritmo mostrado en la figura 1 fue aplicado en aquellos intervalos clasificados según el Gráfico de Abanico como colectores cavernosos comunicados y colectores fracturado-fisurados. De esta manera fue posible evaluar cuantitativamente el grado de fracturamiento y/o cavernosidad de las rocas y estimar su porosidad de matriz.

Se estudió la correlación lineal entre v y m , obteniéndose la siguiente ecuación de regresión:

$$v = 205.22 - 133.44m$$

con un coeficiente de correlación lineal $r = -0.95$; para 40 intervalos analizados ($N = 40$). Estos resultados permiten afirmar la presencia de correlación lineal estable entre ambos parámetros, con un 99% de probabilidad. La Tabla 1 muestra la media y desviación típica de m , v y ϕ de estos colectores.

Parámetro	Media	Desviación
M	1.43	0.22
v (%)	45.3	26.34
ϕ (%)	24.8	9.22

Tabla 1. Estadígrafos Media y Desviación de m , v y ϕ para los intervalos estudiados (N = 40).

Se realizó también el análisis de correlación entre la porosidad de flujo (ϕ_f) definida por Mendoza y Valle (1996) y la porosidad secundaria (ϕ_2) calculada por Aguilera (1976, 1995) según la ecuación (3). Se comprobó que ambas son estadísticamente iguales al obtenerse:

$$\phi_f = -1.08 + 0.97\phi_2$$

con un coeficiente de correlación lineal $r = 0.99$. La Tabla 2 muestra la media y dispersión de los datos empleados en el análisis.

Parámetro	Media	Desviación
ϕ_f	11.1	9.32
ϕ_2	12.5	9.5

Tabla 2. Media y Desviación de ϕ_f y ϕ_2 para los intervalos estudiados (N = 40).

Conclusiones.

La aplicación combinada de las metodologías de interpretación de Mendoza y Valle (1996) y Aguilera (1976, 1995), permite una mejor evaluación de los colectores complejos. Con la primera es posible identificar el sistema poral y con la segunda evaluar cuantitativamente el grado de cavernosidad y/o fracturamiento.

La correlación obtenida entre m y v , demuestra que ambos parámetros son una medida de la porosidad secundaria presente en el colector.

Para colectores cavernosos comunicados, la porosidad de flujo definida y evaluada por Mendoza y Valle, es equivalente a la porosidad secundaria obtenida por Aguilera.

Los resultados obtenidos se corresponden con las características del corte geológico. En las calas interpretadas las descripciones de núcleos reportan la presencia de calizas con desarrollo cársico variable, en ocasiones porosas y margo-arcillosas.

Bibliografía.

- Aguilera, R. (1976).: Analisis of naturally fractured reservoirs from conventional well logs. Journal Petroleum Technology. July. P. 764-772.
- Aguilera, R. (1995): Naturally fractured reservoirs .PennWell Books. PennWell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma.
- Castro, O. (1998): Consultas personales. CEINPET. Ciudad de La Habana, Cuba.
- Gómez-Rivero, O. (1981): A conciliating porosity exponent relationship: its application to practical well log analysis. SPWLA Annual Logging Symposium, 22 June. P. 1-19.
- Mendoza, G. y V. Valle (1996): Modelos petrofísicos para la descripción de yacimientos fracturados. México, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra. 370 p.



- Valcarce, R.M. (1998): Evaluación de las propiedades hidrogeológicas de acuíferos cársicos empleando un complejo mínimo de registros geofísicos de pozo. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Ciudad de La Habana. Departamento de Geofísica, ISPJAE. 130 p.
- Valcarce, R.M. y J. González (1999): Aplicación de la geofísica de pozos para la evaluación de acuíferos. Nueva metodología. Revista Voluntad Hidráulica, No.91. Ciudad de La Habana. CENHICA-INRH. P. 11-20.

CARACTERIZACION DE FUENTES MINERALES EN EL DISTRITO FISICO - GEOGRAFICO PINAR DEL RIO, CUBA.

M. Sc. Boris Peña Fortes⁽¹⁾, Dr. Juan R. Fagundo Castillo⁽¹⁾, M. Sc. Fernando R. Delgado Hernández⁽²⁾, Dr. Laureano Orbera Hernández⁽¹⁾.

(1) Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina" (CENTERVISA), Ave 243, No. 19815, Reparto Fontanar, Boyeros, Ciudad de La Habana, C. P.: 19500, Cuba. C. Elect. : termalis@infomed.sld.cu

(2) Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Edif. Julio A. Mella, Calle L, No. 353 entre 21 y 23, Vedado, Ciudad de La Habana, C. P.: 10400, Cuba, C. Elect. : fdo@geo.uh.cu

RESUMEN

El trabajo que se presenta se enmarca dentro de los estudios de caracterización y clasificación de las aguas minerales, que como parte de los objetivos de trabajo del Centro Nacional de Termalismo (CENTERVISA), se vienen desarrollando en el país. Es conocido que las aguas minerales constituyen, por lo general entidades únicas; esto es: su composición química es diferente en cada yacimiento, manifestación, etc. y la misma depende fundamentalmente de factores geológicos e hidrogeológicos. Dicha composición es estable en el tiempo y puede ser estudiada a través del uso de diferentes Métodos de Caracterización y Clasificación de las aguas.

Basado en lo anterior el trabajo se propone como objetivo fundamental, caracterizar las aguas minerales en un conjunto de fuentes minerales del Distrito Físico - Geográfico Pinar del Río, a partir de un análisis integrador, teniendo en cuenta criterios tales como: origen, propiedades químico - físicas (temperatura, mineralización global, mineralización predominante y especial) y su uso actual y perspectiva. Para ello se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica que permitió la aplicación de diferentes métodos de caracterización, clasificación y representación de las aguas naturales y minerales, según criterios de diferentes autores, lo que dio como resultado la caracterización de las fuentes minerales del Distrito Físico - Geográfico Pinar del Río, el esclarecimiento del modo en que las aguas adquieren su composición química, destacándose el papel que en ello juegan los procesos geoquímicos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas. A tales resultados se suman, la confección de una base de datos de concentraciones de macrocomponentes y tres mapas sobre las fuentes minerales estudiadas.

ABSTRACT

The present paper is about mineral waters researches in Pinar del Rio province, western part of Cuba. The authors present a regional analysis, enphazising in methods of classification of mineral waters. They take into account different parameters like origin, chemical and physical properties (temperature, mineralization) and other like actual and perspective use. As a results there are presented the mechanisms by mean of which natural waters get their mineral composition.

Introducción.

La acción beneficiosa de las aguas y peloides de los balnearios del país se conoce desde hace muchos años de manera empírica, no obstante, no es hasta después de la creación del Instituto de Hidrología y Climatología Médicas en el año 1945, que se comenzaron a hacer investigaciones científicas

encaminadas a dilucidar los mecanismos y los efectos que determinan las causa de tales curas; así como a establecer las prácticas terapéuticas adecuadas y los antagonismos de los diferentes recursos naturales. A pesar de que con la creación de ese Instituto, se comenzaron a desarrollar en Cuba investigaciones encaminadas a la caracterización de los recursos termales y a su aplicación con fines terapéuticos, esta actividad quedó relegada en la década del 60 debido, entre otras causas, a la influencia de las corrientes occidentales imperantes con relación a la medicina convencional.

En años más recientes y debido sobre todo, a la escasez de recursos, la denominada medicina natural ha cobrado fuerzas y en particular, las investigaciones relacionadas con las aguas y peloides, especialmente, después de la creación del Centro Nacional de Termalismo “Dr. Víctor Santamarina” (CENTERVISA), perteneciente al Ministerio de Salud Pública (MINSAP), el cual tiene entre sus objetivos la dirección de las investigaciones multidisciplinarias en el campo del Termalismo.

Dentro del marco de las citadas investigaciones se realiza el presente estudio, con el cual se pretende compilar, organizar y evaluar todo un conjunto de informaciones y datos existentes sobre las principales fuentes minerales del Distrito Físico Geográfico Pinar del Río y llegar a criterios de caracterización y clasificación.

En Cuba los estudios hidroquímicos han sido realizados, solo dentro del marco de los trabajos de exploración hidrogeológica, para la caracterización de las fuentes termales y el estudio fuentes minerales en los diferentes yacimientos, manifestaciones, etc. Sin embargo, no se ha realizado hasta el presente un estudio de tipo hidrogeoquímico encaminado a esclarecer los procesos geoquímicos que tienen lugar en las citadas fuentes y su relación con las propiedades químico-físicas de las aguas presentes.

El Objetivo General de la investigación consiste en caracterizar las aguas en un conjunto de fuentes minerales del Distrito Físico Geográfico Pinar del Río, a partir de un análisis integrador, teniendo en cuenta criterios tales como: origen, propiedades químico-físicas (temperatura, mineralización global, mineralización predominante y especial) y su uso actual y perspectivo. Dicho estudio, caracterización y clasificación se realizará sobre la base de las ideas más actuales sobre la clasificación de aguas minerales, teniendo en cuenta criterios de varios autores.

En el territorio cubano y teniendo en cuenta la existencia de los principales factores del medio físico-geográfico que influyen en la formación de las aguas minerales; estructura geológica, relieve, clima e hidrografía, se originan condiciones que favorecen la ocurrencia de yacimientos de aguas minerales, los cuales están distribuidos a todo lo largo y ancho de la isla y que forman parte de diferentes ambientes geológicos de formación. Dichos yacimientos pueden ser estudiados, a partir de las características de las surgencias naturales (fuentes minerales) que en ellos existen. El estudio puede enfocarse tanto desde el

punto de vista de las condiciones concretas del origen de las aguas, como desde el punto de vista de los ambientes físico-geográficos en que estas brotan.

Fue elegida como área de estudio el Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río, ya que el mismo constituye una de las regiones del país con mayor grado de estudio de las aguas minerales, lo cual aporta un importante volumen de información a procesar. Dentro del distrito e independientemente del grado de estudio que tuviera una zona dada, se decidió estudiar las fuentes minerales sin tener en cuenta la clasificación técnico-económica que los subdivide en yacimientos, manifestaciones, etc. y si la localización real de las mismas en un sector o área determinados.

Materiales y Métodos.

➤ Inventario de Fuentes Minerales en estudio.

Las fuentes minerales en estudio, están distribuidas de oeste a este, a lo largo de 150 Km, aproximadamente, desde el poblado de Arroyos de Mantua hasta el límite con la provincia La Habana y se enmarcan dentro de los sectores [5] que a continuación se reseñan: Sector Zequeira, Sector Los Portales, Sector Aguas Claras, Sector San Vicente, Sector Cueva de los Portales, Sector San Diego de los Baños, Sector Bermejales, Sector El Sitio, Sector Mil Cumbres, Sector Cajálbana, Sector Pan de Guajabón, Sector Rancho Lucas, Sector Cacarajícara, Sector Pozo Azul, Sector Rancho Mar, Sector Soroa y Sector Las Terrazas.

A partir de los datos obtenidos se elaboró un mapa del Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río, donde se muestra la ubicación de los sectores contenedores de las fuentes minerales estudiadas. Los materiales gráficos del trabajo fueron confeccionados con ayuda del programa Mapinfo [10].

➤ Recopilación de la información analítica.

La información analítica base del estudio fue obtenida, fundamentalmente, a partir de los informes de exploración geológica para las aguas mineromedicinales en la Provincia de Pinar del Río [5, 7, 13, 14, 15]. La información obtenida no resultó homogénea, ya que dependía del estadio dentro de la investigación geológica del área en cuestión, así como del grado de profundidad alcanzado en la investigación realizada; no obstante se pudo obtener un total de 361 series de datos, con los que se procedió a realizar el estudio propuesto en el presente proyecto. Los datos iniciales fueron obtenidos en miligramos por litros. Con posterioridad la información inicial fue complementada con resultados analíticos derivados de estudios actuales realizados por el CENTERVISA

➤ **Procesamiento y corrección de los datos.**

Las Bases de Datos iniciales fueron creadas con el programa Hidrowin [2], el cual permitió además hacer la corrección de los mismos, a través del uso del módulo Reports (General), el cual calcula el Balance iónico para cada una de las muestras. El propio programa permitió la conversión de los datos originales en miligramos por litros a otras unidades necesarias para el posterior procesamiento de los datos. Con posterioridad fueron creadas bases de datos, con ayuda del programa Excel [11], lo cual facilitó futuros tratamientos realizados.

➤ **Esquema de trabajo y métodos aplicados en la investigación.**

La Investigación realizada se organizó a partir del siguiente esquema:

- 1 Análisis sobre la distribución de los sectores dentro de las unidades de la Regionalización Físico-Geográfica y Paisajística en el Distrito Pinar del Río.
- 2 Caracterización de todas las fuentes minerales del Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río y uso de diferentes Métodos de Clasificación de las aguas Minerales, a lo cual se adicionó:
 - Aplicación de Métodos de Reconocimiento de Patrones Hidrogeoquímicos.
- 3 Determinación del origen de la composición química de las aguas subterráneas mediante la aplicación de Modelos de Balance de Masas para cada sector.

A partir del estudio teórico-metodológico realizado, fueron seleccionados como criterios clasificatorios más válidos los siguientes:

- Clasificación de Castany (1971), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de su temperatura.
- Clasificación de Armijo Valenzuela y San Martín Bacaicoa (1994), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de su mineralización global o cuantitativa.
- Clasificación de Armijo Valenzuela y San Martín Bacaicoa (1994), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de su mineralización predominante y especial.
- Clasificación de Kurlov, para la clasificación de las aguas desde el punto de vista hidroquímico. En este caso el criterio clasificatorio fue apoyado por el uso de diagramas de Piper-Hill, para la representación de la composición química de las aguas [2]. El propio diagrama de Piper-Hill fue utilizado, dentro del análisis de cada sector, para llegar a conclusiones sobre el origen de las aguas, según lo planteado por Cerón García et al (1993) en [3].
- Clasificación de Korin (1994), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de sus usos.

Resultados y Discusión.

Del total de fuentes estudiadas en el Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río (52 fuentes minerales en 17 sectores), a continuación y a modo de ejemplo, se brindan los resultados de la investigación en la fuente del sector Zequeira.

➤ Sector Zequeira.

El sector se localiza en el Municipio Mantua, 3 Km al este del poblado Arroyos de Mantua. Las coordenadas de su centro son: X: 155 200, Y: 284 600.

La estructura geológica del área es muy compleja y está enmarcada dentro de la Zona Estructuro-Formacional (ZEF) La Esperanza, en su parte más septentrional. El sector está enmarcado dentro de los depósitos de la Fm. Esperanza (J_3-K_1), representado por sedimentos terrígeno-carbonatados y carbonatado-terrigenos. Están presentes también, en el área sedimentos cuaternarios [4, 5, 9].

Hidrogeológicamente la manifestación se asocia con el complejo acuífero de la Fm. Esperanza, con un grado de acuosidad controlado por la tectónica y el consiguiente agrietamiento del macizo rocoso. La fuente más importante en el sector es la conocida con el nombre Azufre de Zequeira, cuyas aguas fueron muestreadas por primera vez por el Instituto de Hidrología y Climatología Médicas (Trelles, 1948) [15] y más recientemente, en el marco de los trabajos de prospección geológica realizados por la Empresa Geológica de Occidente. Actualmente la fuente muestra un caudal constante aproximado a 0.25 l/s y una temperatura de 24 °C [5].

El sector se ubica en un entorno antropizado, correspondiente con una llanura destinada fundamentalmente a cultivos varios y tabaco, dentro de la cual se encuentran diversos asentamientos poblacionales. El sector no cuenta en sus proximidades con valores naturales, factibles de ser explotados desde el punto de vista del turismo. El centro turístico más cercano es Laguna Grande, el cual dista a 75 Km [5]. Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [5], el sector se ubica en la Región Llanura Norte de Pinar del Río y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [4], el sector clasifica como de Llanuras aluvio-marinas, formadas por depósitos arenosos y corteza de intemperismo caolinítica-ferralítica, con plantaciones de tabaco, pastos, sobre suelos Gley amarillento cuarcítico.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [12], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermas. Basados en la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [1], las aguas se consideran Aguas Mediominales. Desde el punto de vista hidroquímico y basado en los criterios dados por Kurlov, las aguas clasifican como Aguas Sulfatadas-Bicarbonatadas Cálcicas y Cálcico-Magnésicas, todo lo cual se ilustra mediante diagramas de Piper-Hill,

teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [1], las mismas resultan sulfuradas. El análisis del propio diagrama de Piper-Hill, sobre el origen de las aguas, da como resultado que las mismas se agrupan en el campo de las aguas de origen mixto. De acuerdo a su uso actual y perspectivo (Korin, 1994) [12], las aguas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 161-136, cuya expresión gráfica se representa mediante diagramas de Stiff. Aplicando los Modelos de Balance de Masas se obtiene que los principales procesos geoquímicos, que explican la composición química de las aguas del sector son los siguientes: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita) y oxidación de pirita, con reducción parcial de sulfato. Estos procesos son coherentes con la presencia mayoritaria de los minerales calcita y dolomita en las calizas de la región (Furet et al, 1998) [8] y de materiales terrígenos de tipo esquistos arenosos (Peláez et al, 1990) [14]. La fuente de sulfatos puede atribuirse, tanto a los materiales carbonatados (Embil, 1947) o a las formaciones polimetales, abundantes en esta región pinareña. Los procesos de reducción de sulfatos, lo cual origina presencia de H_2S , HS o azufre coloidal dependen del valor del pH y el ambiente reductor local, lo cual origina procesos biogeoquímicos.

Conclusiones.

1. En el distrito Físico-Geográfico Pinar del Río existe un gran potencial de aguas minerales. Dichas fuentes minerales, dependiendo de la información existente, pueden ser caracterizadas y clasificadas desde el punto de vista de sus parámetros físico-químicos más importantes.
2. Los métodos geoquímicos de reconocimiento de patrones y balance de masas constituyen herramientas útiles para interpretar el modo en que las aguas minerales adquieren su mineralización y composición química.
3. Excluyendo un grupo de fuentes, cuyo estudio es incompleto y teniendo en cuenta diferentes criterios clasificatorios, las fuentes de aguas minerales estudiadas clasifican, mayoritariamente, como aguas hipotermales, mediminerales, sulfuradas, bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas cálcicas y cálcico-sódicas, originadas, fundamentalmente, a partir de fluidos meteóricos fríos o calientes y con un uso predominantemente balneológico y terapéutico.
4. Del análisis de la distribución de las fuentes minerales en las diferentes unidades de paisaje, dentro del Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río, se obtiene que la mayoría se concentran en la zona de mayor complejidad paisajística, lo cual coincide con la Región Físico-Geográfica Montañas de la Sierra del Rosario y cercanos o en la frontera entre dos unidades de paisaje, lo cual es coincidente con los criterios geólogo-estructurales utilizados en la subdivisión de dichas unidades.

5. Las fuentes se distribuyen dentro de unidades correspondientes a las Llanuras medianamente húmedas (1.2.) y a las Depresiones intermontañas, colinas, alturas y montañas bajas húmedas (2.2.); a partir de lo cual se produce, a su vez, la distribución de los sectores en 7 unidades paisajísticas de menor orden.
6. En el estudio realizado se ha podido comprobar que la composición química de las aguas está determinada, fundamentalmente, por la litología y la estructura geológica.
7. El origen de la composición química de las aguas que drenan los macizos carbonatados se explica fundamentalmente por los procesos geoquímicos de disolución congruente de calcita, dolomita y halita; disolución incongruente de plagioclasas; oxidación de piritas, con reducción parcial de sulfatos y generación biogénica de CO₂.
8. En los acuíferos desarrollados en sedimentos constituidos por aluminosilicatos, la composición química de las aguas se explica por la ocurrencia, fundamentalmente, de procesos geoquímicos de disolución congruente de serpentina y halita, así como disolución incongruente de plagioclasas (albita y anortita), acompañados de oxidación de piritas, con reducción parcial de sulfatos y generación de CO₂; también se produce precipitación de cuarzo, principalmente en las aguas más profundas.
9. En las zonas más someras son más intensos los procesos de generación de CO₂ por oxidación la materia orgánica del suelo, mientras que en las zonas más profundas son más relevantes los procesos de oxidación de piritas y disolución incongruente de plagioclasas.

Bibliografía.

1. Armijo Valenzuela, M. y J. San Martín Bacaicoa (1994). **Clasificaciones de las aguas mineromedicinales**, en **Curas Balnearias y Climáticas: Talasoterapia y Helioterapia**. Editorial Complutense. Madrid, España. 218-223.
2. Calmbach, L. (1990-95). **HIDROWIN** (Versión 3.0). Institut de Minéralogie BFSH2. Lausanne, France.
3. Cerón García, J. C. y otros (1993). **Caracterización hidroquímica y análisis de los estados de equilibrio termodinámico en aguas termominerales de Alhama de Murcia, España**. Estudios Geológicos. Volumen 49 (1-2). Madrid, España.
4. Colectivo de autores (1988). **Nuevo Atlas Nacional de Cuba**. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba, Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía e Instituto Geográfico Nacional de España. Ciudad de la Habana, Cuba.
5. Dirección Provincial de Planificación Física Pinar del Río. Departamento de Planeamiento Turístico. Empresa Geominera Pinar del Río. (1998). **Potencial de aguas minerales de la provincia Pinar del Río**. (documento inédito). Pinar del Río, Cuba.



6. Embil, J. (1947). ***El ácido sulfhídrico de las aguas medicinales de San Diego de los Baños y su posible relación con las calizas fétidas de donde brotan***. Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año I, No 4, 17-20.
7. Empresa Geológica Pinar del Río. (1997). ***Reporte de las investigaciones Hidrogeológicas en el yacimiento de Agua Mineral Natural: Los Portales***. Archivo Oficina Nacional de Recursos Minerales. Pinar del Río, Cuba. 50 p.
8. Fagundo, J.R. (1998), ***Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales***. Ingeniería Hidráulica. La Habana (Cuba). Vol. XIX (2): 62-79.
9. Gutiérrez Domech, R. y M. Rivero Glean (1997). ***Minigeografía de Cuba***. Editorial Científico-Técnica. Ciudad de la Habana, Cuba, 142 p.
10. MapInfo Corp. (1985-96). ***MapInfo Professional*** (Versión 4.1).
11. Microsoft Corp. (1985-97). ***Excel for Windows***.
12. Morell Evangelista, I. (1995). ***Origen del Termalismo Geotermómetros en Algunas peculiaridades hidrogeoquímicas de las Aguas Termales***. Memorias de las 3^{ras} Jornadas sobre Termalismo. Grupo Nacional de Termalismo. Santa Clara, Cuba.
13. Peláez García, R. y otros (1995). ***Informe de cancelación P. D. Para la construcción de la fuente de agua mineral natural Aguas Claras, Pinar del Río***. Empresa Geológica Pinar del Río, MINBAS. Archivo Oficina Nacional de Recursos Minerales. Ciudad Habana, Cuba, 50 p.
14. Peláez, R. y otros (1986-90). ***Informe para la Búsqueda detallada- Exploración orientativa de las aguas mineromedicinales San Diego-Bermejales***. Empresa Geológica Pinar del Río, MINBAS. Archivo Oficina Nacional de Recursos Minerales. Ciudad Habana, Cuba, 176 p.
15. Portuondo López, I. y otros (1998). ***Factores de control de la composición química de las aguas subterráneas en una zona minera en el noroeste de Pinar del Río, Cuba***; en Memorias del 3^{er} Congreso Cubano de Geología y Minería. Palcograf: Artes Gráficas. Ciudad de la Habana, Cuba, 588-591.
16. Trelles, F. (1948). ***Análisis de algunas aguas minero-medicinales cubanas estudiadas por este Instituto***. Archivos del Instituto Nacional de Hidrología y Climatología Médicas, Año II, No 2, 171-184.

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS

Geomechanics Characteristics of the Mass Rock

Autor: M.Sc. Maday Cartaya Pire (*).

E-mail: mcartaya@moa.minbas.cu

Dr. Roberto Blanco Torrens ()**

(*) Master en Geomecánica. Departamento de Geología, Facultad de Geología y Minería.

(**) Especialista en Mecánica de Rocas y en construcción subterráneo. Departamento de Minería, Facultad de Geología y Minería.

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Las Coloradas S/n, C.P. 83329. Moa, Holguín, Cuba

Resumen

Se realiza un análisis de las características geológicas y geomecánicas de los macizos rocosos en varias minas y túneles subterráneos de la región oriental del país. Este análisis permite definir los modelos geomecánicos que caracterizan en forma representativa el macizo en estas minas.

Se proponen para cada mina subterránea los modelos de interacción macizo – fortificación factibles a utilizar para el diseño de la fortificación; recomendándose en cada caso expresiones para el cálculo de la presión actuante en correspondencia con el modelo asumido.

Estos resultados hacen más confiable cualquier evaluación o pronóstico de estabilidad, campo tensional, riesgos, presión minera y otros que se realice, todos de gran importancia para la actividad de proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas.

Palabras claves: Modelos geomecánicos, Modelos de interacción macizo – fortificación, Geomecánica.

Abstract

An analysis of the geological and geomechanic characteristics of the mass rock in underground mines and tunnel, in eastern region of country is made. This analysis allows to define the geomechanic models that in more representative form characterize the massive in these mines.

They interaction models massives – fortification feasible to use for the design of the fortification are proposed for each underground mine, and it's recommended in each case the expressions for the calculation of the pressure acts upon the fortification in correspondence with the assumed models you in correspondence with the assumed model.

These results make more reliable any evaluation and stability forecast, tensional field, risks, mining pressure and other that it is realize, all these aspects are of great importance for the projection, construction and development of underground works.

Keywords: Geomechanics models, Interaction models massive – fortification, Geomechanic

INTRODUCCION

La demanda de materiales se hace cada vez mayor en el mundo y por consiguiente se hace cada vez más necesaria la explotación de los recursos minerales, para abastecer el desarrollo tecnológico actual. La extracción de los minerales de las entrañas de la tierra puede realizarse por el modo a cielo abierto o por el subterráneo. La profundidad de yacencia de los cuerpos minerales y la afectación al medio; son de los aspectos fundamentales en que se basa la Ciencia Minera para elegir un modo u otro. Los retos actuales que nos impone la naturaleza para su protección, prevé que en un futuro no muy lejano, la explotación de los yacimientos se realice mayormente por el modo subterráneo.

Al realizar las obras subterráneas, se rompe el estado tensional de equilibrio que existía en el macizo antes de aperturar las mismas, dando lugar a una redistribución de tensiones que incide directamente en el comportamiento de las rocas que circundan las excavaciones.

Constituye un problema para la realización rentable y segura de los trabajos mineros subterráneos, el no conocer las propiedades mecánico estructurales del macizo, no poseer un análisis detallado de las características de las rocas y no contar un estudio de estabilidad del macizo teniendo en cuenta su comportamiento tensional y deformacional.

Aún con el desarrollo que han tenido los estudios geomecánicos en Cuba y el mundo en los últimos 20 años, se continúa analizando el comportamiento de los macizos de forma generalizada y no específicamente como lo requiere el comportamiento variado que presentan las rocas que circundan una obra minera. Actualmente en nuestro país, para el estudio de los campos tenso – deformacionales que surgen en los macizos rocosos y para la evaluación de la presión actuante, elección y diseño de los métodos de sostenimiento de las obras subterráneas, los macizos no son diferenciados según su modelo geomecánico y modelo de interacción macizo - fortificación, lo cual en muchos casos produce afectaciones de índole económico o afecta la seguridad de la obra.

La investigación tiene como objetivo esencial representar los diferentes sectores del macizo rocoso de las minas y túneles estudiadas mediante modelos geomecánicos y modelos de interacción macizo – fortificación. Las minas subterráneas estudiadas son, la mina Merceditas, en la provincia Holguín y "El Cobre", en Santiago de Cuba, que explotan yacimientos de cromo y cobre respectivamente y varios túneles del trasvase Melones - Sabanilla. La investigación facilita en forma significativa y hace más confiable cualquier evaluación o pronóstico de estabilidad, campo tensional, presión minera, riesgos y otros aspectos de gran importancia para la actividad de proyecto, construcción y explotación de las obras subterráneas, todo esto conlleva un aprovechamiento racional de los recursos y a la protección del medio.

Para la realización del presente trabajo se emplea una metodología integral de investigación, que cuenta con un gran volumen de trabajos experimentales (de campo, in situ y de laboratorio) y un fuerte trabajo analítico en el desarrollo y fundamentación de los diferentes criterios y metodologías que se emplean. Esta metodología puede ser generalizada para el estudio de cualquier macizo rocoso tanto subterráneo y de superficie.

BREVES CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LOS YACIMIENTOS

La zona de estudio de la **mina Merceditas** se encuentra enmarcada en el Complejo Ofiolítico Moa - Baracoa. En Cuba oriental (Cobiella 1984), está expuesto a uno de los más grandes

ejemplos en el área del caribe de estructuras de escamas tectónicas. La tectónica de la región es compleja, en estas como en otras zonas de Cuba se pone de manifiesto la superposición de fenómenos tectónicos originados en condiciones geodinámicas contrastantes y en diferentes períodos, así el sistema de mantos tectónicos y el intenso plegamiento que caracteriza la estructura geológica de las secuencias más antiguas que surgieron en un ambiente de compresión máxima, generándose los eventos tectónicos más jóvenes fundamentalmente bajo la acción de esfuerzos de tracción de la corteza terrestre, desarrollándose fallas que dividieron la zona en una serie de bloques horsticos y grabens, enmarcándose así las estructuras más antiguas. Los movimientos de traslación horizontal que favorecen el emplazamiento de los mantos tectónicos de Cuba oriental fueron de gran magnitud, al menos para las serpentinas que forman la principal unidad tectónica alóctona.

Las litologías presentes que fueron estudiadas son: Periodistas, Periodistas serpentinizadas, Dunitas, Gabros, Cromitas .

El yacimiento “ El Cobre ” esta ubicado en un nudo de intersección de fallas de diferentes direcciones y edades, a lo largo del mismo se ubica la falla regional El Cobre que se extiende al este de Gitanilla con dirección latitudinal, atravesando todo el yacimiento. Otro sistema importante son las fallas submeridionales incidentes a la falla El Cobre desde el sur, que tienen un orden secundario y se pueden ubicar como fallas preintraminerales con dirección (55 – 65)° bien definidas al norte del yacimiento. El tercer sistema son las fallas transversales o nordeste, que afectan y deforman las estructuras minerales. Estructuralmente el área de trabajo está relacionada con la zona de desarrollo del arco volcánico del Paleógeno.

Las litologías más comunes son tobas de diversas granulometrías de composición andesíticas y andesito – dacítica, tobas aglomeradas, lavas, brechas, mantos de lava, de composición andesítica hasta riódacítica, cuerpo subvolcánico y dique de composición media, tufitas e intercalaciones de caliza.

El trasvase Melones – Sabanilla se encuentra ubicado en la Sierra de Nipe – Cristal, desde el río Mayarí hasta la Presa Sabanilla. Situada al oeste de CAI Loynaz Hechavarría, en toda la porción del borde norte del municipio Mayarí.

La región de estudio está constituida por dos grandes complejos bien definidos: Complejo clástico – carbonatado y Complejo ultramáfico – serpentizado.

El primero está constituido por calizas, margas, conglomerado brecha basal, etc. El complejo de rocas ultramáficas serpentinizadas está representado por las serpentinitas brechosas y los gabroides. Los procesos de serpentización han sido muy intensos , esta región está afectada por movimientos tectónicos que han permitido su automorfismo, proceso que ha originado varios tipos de serpentinitas entre los que tenemos: serpentinitas harzburgitas, serpentinitas ortopiroxenitas olivínicas argilitizadas, serpentinitas harzburgíticas argilitizadas, serpentinitas ocretizadas, talquitizadas y carbonatadas, serpentinitas ocretizadas lixiviadas y serpentinitas carbonitizadas.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL AGRIETAMIENTO

En la mina Merceditas que existen tres sistemas principales de agrietamiento en el macizo, las grietas se encuentran desde rellenas de carbonato de calcio a vacías con abertura de 1 a 5mm. con



ligera alteración, en las peridotitas alteradas y con paredes sanas en las cromitas, dunitas, peridotitas, peridotitas serpentinizadas y garbos. Con superficies onduladas – lisas en las peridotitas, peridotitas alteradas y garbos y planas – rugosas en las peridotitas serpentinizadas, dunitas y cromitas. Un espaciamiento promedio de 0,6 – 2m, en las peridotitas, de 0,2 – 0,6m en las peridotitas serpentinizadas, peridotitas alteradas, cromitas, dunitas y garbos. para un tamaño del bloque Grande ($0,2 - 10 \text{ m}^3$), y un bloque muy pequeño ($10 - 200 \text{ cm}^3$), para las peridotitas alteradas, según Palmstron (1995). [] []

Para la mina El Cobre la grietas se agrupan fundamentalmente en dos sistemas, el mayor porcentaje están rellenas, las tobas andesíticas de color gris verdoso y en las porfiritas se encuentran ligeramente rugosas con espaciamiento menor de 1mm, y abertura de 1 a 5 mm en las tobas, diaclasas continuas, con paredes sanas, poca afluencia de agua, con un espaciamiento promedio entre grietas de 0,2 – 0,6m, para un tamaño del bloque Grande ($0,2 - 10 \text{ m}^3$), según Palmstron (1995). [] []

En el Trasvase Melones – Sabanilla se estudiaron varios túneles, tales como: Túnel Seboruquito – Esperanza, Túnel Esperanza – En medio, Túnel Enmedio – Guayabo, Túnel Guayabo – Pontesuelo, Túnel Guaro – Manacal, Túnel Melones – Levisa, Túnel Yagrumal – Guaro, Túnel Castellano 2 – Juliana 3. en este trabajo exponen los resultados para el túnel Esperanza – Enmedio. Donde la mayoría de las grietas en todo el macizo son medio abiertas, con una abertura entre 1-5mm. Rellenas fundamentalmente por carbonato de calcio. En las partes más meteorizadas predominan las grietas con iguales aberturas pero vacías, esto se debe a la alteración y posterior lixiviación del material de relleno. Las distancias predominantes entre grietas son de 6 - 30cm, con un promedio de 20cm. En segundo lugar predominan las mayores de 6cm para los sectores más alterados, ya que las rocas se encuentran fragmentadas o trituradas. De acuerdo a las condiciones de las fracturas, predominan las onduladas – rugosas y en segundo lugar las planas – rugosas. Esto no es válido para las gabrodiabasas, donde predominan las planas lisas y en segundo lugar las planas – rugosas. Para un bloque Extremadamente pequeño ($< 10 \text{ cm}^3$), según Palmstron (1995). [] []

CARACTERÍSTICAS GEOMECAÑICAS DE LAS ROCAS. MODELOS GEOMECAÑICOS Y DE INTERACCIÓN MACIZO FORTIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS.

las principales características geomecánicas de las rocas se encuentran en las tablas de la I a la III, Teniendo en consideración en comportamiento de la rocas observado en las excavaciones, así como las particularidades geológicas, tectónicas, de agrietamiento, las principales formas de pérdidas de estabilidad en las rocas y partiendo del análisis de las curvas σ_c & E, y de las características observadas en los círculos de Mohr, así como la valoración general del macizo por varios criterios de evaluación estabilidad (Deere, Barton, y Bieniawski) se proponen como modelos más representativo el elástico, elástico – plástico y el frágil. a continuación se muestran los círculos de Mohr y las curvas σ_c & E, que caracterizan a las rocas más típicas. ver gráficos No 1, 2, 3, 4, 5 y 6. []

CONCLUSIONES.

- Se realiza la caracterización geomecánica del macizo estudiado por sectores de excavación.

- Del estudio integral detallado efectuado en el macizo se determinaron las principales formas de pérdidas de estabilidad, su principio de acción y las causas que las provocan.
- Se proponen los modelos geomecánicos y modelos de interacción macizo – fortificación teniendo en cuenta el comportamiento mecánico – estructural del macizo rocoso por sectores de excavación estudiados.
- Es posible mediante la clasificación de los macizos rocosos en modelos geomecánicos y modelos de interacción macizo – fortificación dar a cada sector del macizo un tratamiento diferenciado, tanto en el estudio tenso –deformacional, como de evaluación de la presión minera.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- André, Joao. Pedro. Caracterización mecánico estructural del macizo rocoso de la mina subterránea El Cobre, Santiago de Cuba. [trabajo de diploma] 1998. ISMM. Moa.
- 2.- Blanco, T. R. Estudio de la estabilidad y la presión minera en las excavaciones subterráneas :Unión Nacional de Loja, Ecuador. 1993.
- 3.- Blanco, T. R. y E. Rodríguez. Características de formación de rocas destruidas en el techo de las excavaciones. Revista Minería y geología. No 2, Cuba. 1988.
- 4.- Blanco, T. R. Estudio de la estabilidad y la presión minera en las excavaciones subterráneas: Unión nacional de Loja, Ecuador, 1986.
- 5.- Cartaya, Pire. M. Caracterización geomecánica de los macizos rocosos [Tesis de maestría]1996. ISMM, Moa .
- 6.- Cotilla, Rodríguez. M,O, Bankwitz y otros. Cinemática neotectónica de Cuba Oriental Rev. Soc. Geológica de España, 11 (1 - 2): 33-42. 1998.
- 7.- Gutiérrez, G. L. Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de las minas Merceditas y Amores. [Trabajo de diploma] 1996. ISMM, Moa.
- 8.- Informe Geológico. Mina Merceditas. Cuba, 1996.
- 9.- Informe Geológico. Mina El Cobre. Cuba, 1996.
- 10.- Informe Geológico. Túnel Esperanza - Enmedio, Tránsito Melones -. Sabanilla. Cuba, 1992.
- 11.- Proenza,J.A. Mineralización de cromita en la faja ofiolítica de Mayarí – Baracoa (Cuba). Ejemplo del Yacimiento Merceditas. [Tesis Doctoral]. Universidad de Barcelona, España, 1997, 227h.
- 12.- Colectivo de autores. Ingeotúneles: Carlos López Jimeno __ Madrid. 1998. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T - I y T – II, 459p.
- 13.- Colectivo de autores. Manual de ingeniería de túneles. Carlos López Jimeno __ Madrid. 1998. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid.

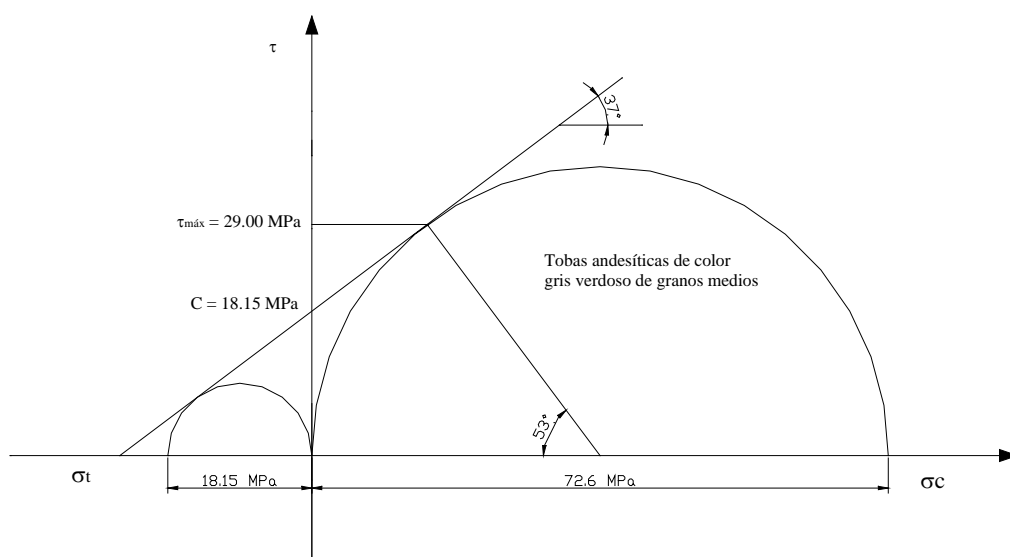


Grafico No.1. Círculo de Mohr, Tobas andesíticas de color gris verdoso de granos medios.

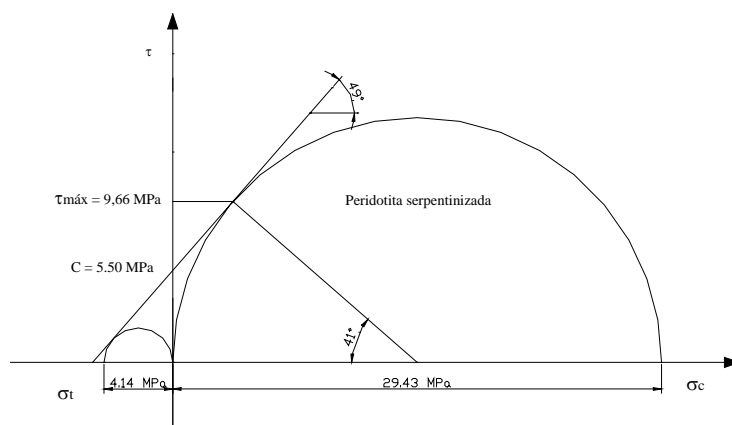


Grafico No.1. Círculo de Mohr, Peridotita serpentinizada, mina Merceditas.

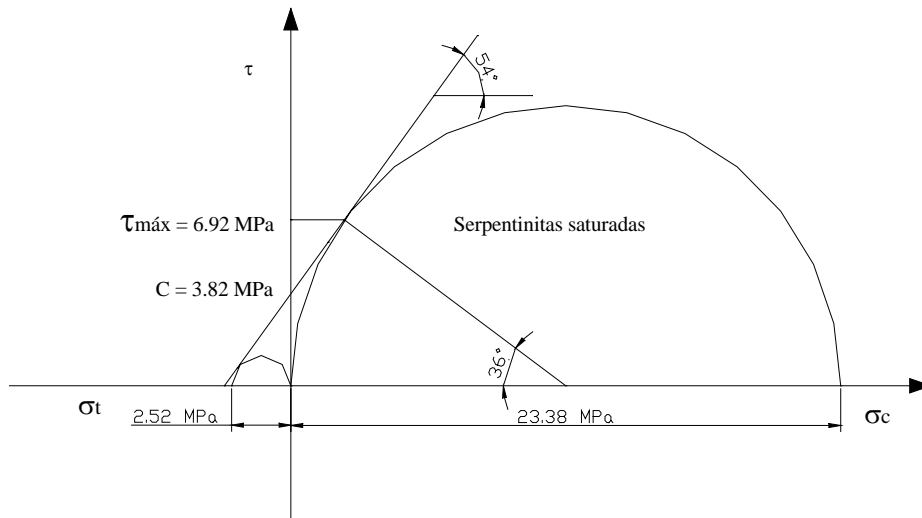
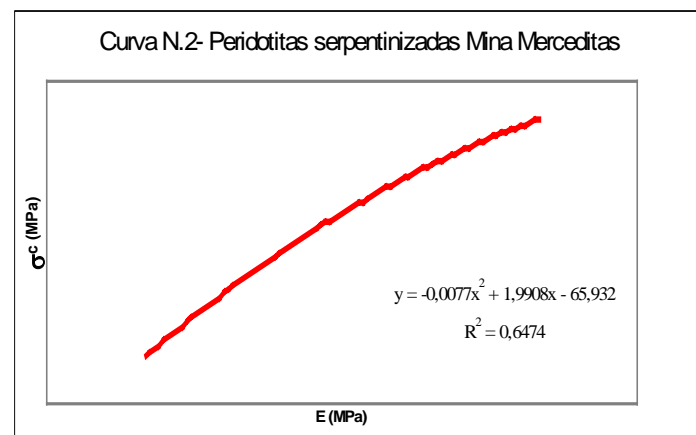
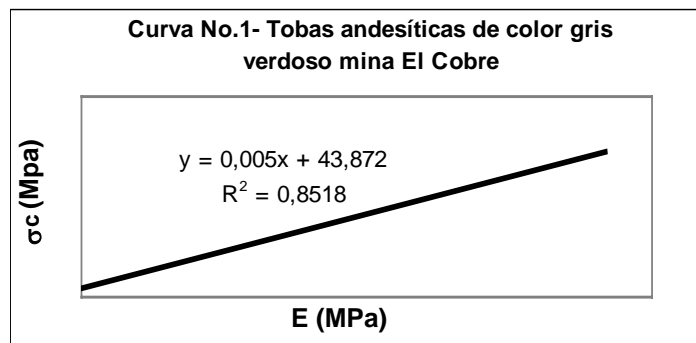


Grafico No.3. Círculo de Mohr, Serpentininita en estado saturado, túnel Esperanza – Enmedio



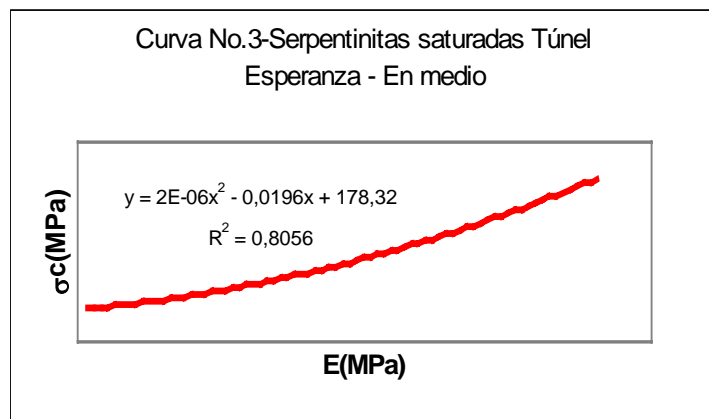




Tabla No. I. Modelos geomecánicos y de interacción macizo - fortificación más representativos del macizo rocoso de la Mina Merceditas

Mina Merceditas										
Sector	Característica mecánico - Estructurales					Estabilidad			Modelo Geomecánico	Modelo de interacción macizo - fortificación
	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	γ_v (Kn/m ³)	E (Mpa)	Jv (grietas / m ³)	RQD	Q	RMR		
Dunitas	31,2	4,65	26,5	9470	6	Excelente	Buena	Buena	Frágil	Rígido - plástico
Cromitas	43,33	4,65	37,7	12084	7,34	Excelente	Media	Media	Elástico - plástico	Elástico - plástico
Gabro	67,76	7	28,5	1185	7,57	Media	Media	Buena	Elástico - plástico	Elástico - plástico
Peridotita alterada	47,09	5,19	27,1	579	10,93	Buena	Mala	Mala	Frágil	Rígido - plástico
Peridotita serpentizada	29,43	4,14	27,3	8371	7,8	Buena	Media	Buena	Elástico - plástico	Elástico



Tabla No. I. Modelos geomecánicos y de interacción macizo - fortificación más representativos del macizo rocoso de la mina El Cobre.

Mina El Cobre										
Sector	Característica mecánico - Estructurales					Estabilidad			Modelo Geomecánico	Modelo de interacción macizo - fortificación
	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	γ_v (Kn/m ³)	E (Mpa)	Jv (grietas / m ³)	RQD	Q	RMR		
Tobas andesíticas de color gris verdoso	72,6	18,15	25,5	5918	7,2	Excelente	Media	Buena	Elastico	Elástico - Plástico
Porfiritas	24,86	4,22	24,7	6387	3,00	Excelente	Media	Buena	Elastico	Elástico - Plástico
tobas de granos medios	47,5	9,97	24,4	5786	3,00	Excelente	Media	Media	Elástico	Elástico - Plástico
tobas brechosas	28,4	5,39	23,4	4325	2,50	Buena	Media	Media	Elástico - plástico	Elástico - Plástico



Tabla No. III. Modelos geomecánicos y de interacción macizo - fortificación más representativos del macizo rocoso del túnel Esperanza – Enmedio.

Túnel Esperanza – Enmedio.										
Sector	Característica mecánico - Estructurales					Estabilidad			Modelo Geomecánico	Modelo de interacción macizo - fortificación
	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	γ_v (Kn/cm ³)	E (Mpa)	Jv (grietas / m ³)	RQD	Q	RMR		
Conglomerados brecha en estado seco	19,29	4,18	23,7	11899	28,7	Muy mala	Muy mala	Media	Elástico - plástico	Elástico - plástico
Conglomerados brecha en estado saturado	16,89	1,73	25,6		31,8	Muy mala	Ext. Mala	Media	Elástico - plástico	Elástico - plástico
Serpentinita en estado seco	37,03	4	23,4	9483,11	11,5	Buena	Buena	Media	Elástico - plástico	Elástico - plástico
Serpentinita en estado saturado	23,32	2,57	24,5		31	Buena	Media	Media	Frágil	Rígido - plástico

CRITERIOS DE ESTABILIDAD EN EL ANALISIS DEL ASENTAMIENTO DE TERRAPLENES Y DIQUES EN SUELOS BLANDOS.

Ernesto Rocamora Alvarez

Grupo de Aguas Terrestres del Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 # 2906 e/ 29 y 31, La Coronela, La Lisa, Ciudad de La Habana, CP 11600, Cuba. Email: rocamora@geoastro.inf.cu

RESUMEN

El asentamiento de las estructuras ingenieriles, es un proceso bastante analizado por la Geotecnia. Sin embargo, existen muchos Proyectos donde este estudio se complica debido a las características particulares de las capas bases de cimentación y a la distribución de las cargas de las Obras, como son los Terraplenes y Plataformas de materiales locales sobre las zonas pantanosas.

Teniendo en cuenta las particularidades de los procesos de asentamiento de los suelos blandos, condicionados por las consolidaciones primarias y secundarias de magnitudes considerables, y por la geometría de las estructuras de tierra mencionadas, hace algunos años se comenzó a utilizar una metodología de cálculo de asentamiento, con resultados favorables. El empleo de este método de cálculo en varios Proyectos, ha demostrado la capacidad de servir al Investigador como una herramienta de pronóstico de deformaciones, donde a partir de una zonación geotécnica de las magnitudes de los esfuerzos tangenciales de la base de cimentación, se pueden establecer puntos de inestabilidad de la Obra.

Tomando las salidas de la citada metodología, se llega a un análisis de cómo influye la modificación de la geometría de las Obras y de los procesos constructivos, sobre los parámetros de estabilidad descritos, mostrando el comportamiento de la dinámica del fenómeno de asentamiento ante ellos. Estos criterios toman importancia al poder llegar a un diseño del Proyecto partiendo de un análisis de pronóstico de estabilidad.

ABSTRACT

The structures sinking are a wide analysed process by Geotechnics. However, in some cases this study gets complicated due to characteristics of the foundation layers and to the load distribution in the works, like in the embankments and earth platforms on wetlands.

Keeping in mind the particularities of the sinking processes in soft soils, due to the primary and secondary consolidations, and the geometry of the mentioned structures, some years ago the author began to use a new methodology to calculate the sinking. This methodology becomes in very useful tool to study the base earth platforms deformations, using the geotechnic survey parameters like tangential efforts magnitudes of the foundation base, to determinate the non stability points of the work.

Using this method, we conclude that the geometry of the works and its construction determine the stability parameters and shows the sinking dynamics. These approaches are quite important to take decisions in a project design from the point of view of stability.

Introducción

La cimentación sobre suelos blandos o turbas, ha constituido un problema de la mecánica de suelos y la ingeniería geológica, resuelto por varias formas de tratamiento de la relación suelo-cimiento, las cuales van desde la cimentación sobre pilotes hasta la cimentación sobre plataformas de materiales locales. Son varias las metodologías de cálculo para definir los criterios de proyección de estas plataformas de

mejoramiento o diques, pero sin embargo, en muchas ocasiones no se cubren totalmente las exigencias de este tipo de Proyecto, que requiere de un tratamiento diferenciado para estas estructuras y sus respectivas bases de cimentación.

A partir de la metodología de Drosd (Drosd, 1971), utilizada por primera vez en Cuba, para el cálculo del asentamiento del Dique Sur de la Habana (Rocamora, 1993), se ha podido disponer de una herramienta, que basada en la formulación de Boussinesq y Carothers, y con ajustes de aplicabilidad (Rocamora, 1994), ha cubierto los requerimientos de estudio del asentamiento de varias Obras Ingenieras sobre suelos blandos.

Validación de la metodología por casos de estudio

Con vistas a cuantificar las deformaciones por asentamiento que había sufrido el Dique Sur de la Habana, en 1989 se realizaron una serie de trabajos de campo y laboratorio, que constituyeron las primeras investigaciones ingeniero-geológicas a esta Obra, y que además sirvieron para los cálculos de pronóstico de deformaciones tanto en la base de cimentación como en el propio cuerpo del Dique.

A partir de estos datos y aplicando la metodología de Drosd, se obtuvieron los valores de asentamiento total, esperados para estos suelos, permitiendo llegar a un pronóstico de deformación y estabilización, además de aportar varias recomendaciones para la etapa de construcción de nuevos tramos proyectados.

Algún tiempo después de este estudio, un Proyecto de una red de alcantarillado en Varadero, exigía el cálculo y pronóstico de la deformación de un relleno constructivo como base de cimentación a esta Obra. Como problemática fundamental se presentaba la necesidad de conocer el asentamiento total que se produciría, y poder minimizar su efecto. Los cálculos realizados permitieron estimar las magnitudes de la deformación, recomendando una serie de criterios para la fase constructiva que además de ser una favorable solución ingeniera, fue un resultado económicamente viable.

Más recientemente, se pudo disponer de varios parámetros de un Proyecto de la Autoridad Portuaria en Cádiz, España, que como método para el estudio del asentamiento de los suelos blandos en el área del Proyecto, se construyó un terraplén experimental de 12 m de altura, donde se instalaron varios puntos de nivelación, que permitieran el seguimiento, instrumentalmente, de la dinámica del asentamiento. Los resultados fueron satisfactorios al medirse asientos de 0.87 m en los extremos y de hasta 2.98 m en el centro.

Aprovechando este trabajo, se aplicó teóricamente la metodología de Drosd, que modelando el terraplén experimental, se hizo el cálculo de asentamiento, resultando valores de 0.87 y 3.07 m. Estos resultados teóricos, no difieren significativamente de los resultados de las pruebas "in situ", además de que se pudo

comprobar la similitud entre las curvas que representan la dinámica del asiento “teórico” e “in situ”, y estimar como período de mayor deformación la etapa inmediata post-construcción.

Toda esta experiencia, aún insuficiente, nos ha dado la posibilidad de conocer el comportamiento de la dinámica del fenómeno en estos tipos de suelo. Por otra parte, han permitido ampliar la capacidad de interpretar una serie de aspectos relacionados con las etapas tempranas del asentamiento, al poder describir los esfuerzos que se generan en la base de cimiento por influencia de la Obra.

Interpretación de los resultados

Como parte del procesamiento de los datos, en el cálculo de los asentamientos, se obtienen resultados parciales de los esfuerzos que se producen en las capas de suelos bases de cimentación. Estos esfuerzos son:

- Los esfuerzos principales P_1 y P_2
- Los esfuerzos tangenciales T_{zx}
- Los esfuerzos máximos tangenciales T_{max}
- Los esfuerzos normales verticales G_z
- Los esfuerzos normales horizontales G_x
- Los esfuerzos cortantes generales T_c

los cuales se determinan para cada punto de una red de ellos que se establece en todo el perfil de la base de cimentación y con coordenadas x y z (figura 1).

Es importante considerar que en la determinación de estos esfuerzos que se generan por la influencia de la Obra sobre el suelo, se tienen en cuenta varias particularidades dadas en primer lugar al considerar un área uniformemente cargada y totalmente flexible, lo cual establece que las presiones que el área cargada pasa al suelo serán idénticas a la presión uniforme sobre ella. Por otra parte, el asentamiento no será uniforme, al alcanzar un máximo en el centro y unos mínimos en los extremos.

Otra de las cuestiones, es la relación que se establece entre el proceso de deformación que se produce en los suelos blandos y su espesor. Sobre este aspecto hay varios criterios que coinciden al establecer que a medida que aumenta el espesor de las capas de suelo, aumenta la magnitud del asentamiento de las plataformas de igual tamaño. Esta regularidad es bastante significativa para espesores de la base de cimientos de hasta 4 m, aunque con espesores mayores se han observado fenómenos de magnitudes muy peligrosas para la estabilidad de las Obras. En la figura 2a se muestra la tendencia registrada por las magnitudes del Asentamiento de un Dique, en condiciones de diferente espesor de la capa de suelo base. Es interesante destacar que, independientemente de las magnitudes de asentamiento que se

alcanzan (figura 2b), la distribución de esta deformación ocurre hasta una profundidad relativamente constante para una misma Obra, aunque cambie el espesor de la capa base.

Estas regularidades mostradas, indican un aspecto muy importante a tener en cuenta en el diseño y posterior monitoreo de las deformaciones en los casos de Obras lineales o terraplenes de viales, donde es muy común que el trazado corte áreas con diferentes espesores de capas por paleocauces enterrados o irregularidades morfológicas de la paleosuperficie, y para los que será necesario un tratamiento diferenciado, por tramos.

Otro aspecto muy importante que se debe tener en cuenta para la cimentación sobre suelos blandos, es respecto a la relación que se establece entre el coeficiente de porosidad (e) y la permeabilidad (k_f), y la resistencia al corte de estos suelos, la cual no analizaremos en este trabajo, pero que sugerimos considerarla en los análisis de estabilidad.

Estos criterios presentados son fundamentalmente producto del cálculo del asentamiento como un fenómeno resultante ante la cimentación de estructuras, sin embargo es importante hacer énfasis en la interpretación de otros aspectos derivados del análisis del comportamiento de los esfuerzos que se generan producto de la carga del suelo.

En la figura 3a se muestra la distribución de los esfuerzos máximos tangenciales y verticales normales, generados con la construcción de una plataforma de relleno de 1.00 m de alto, para toda la capa de cimentación en profundidad. La magnitud de estos esfuerzos no estará relacionada con el espesor de la capa base, pero si con el diseño de la Obra. Es importante destacar que esta dependencia mantendrá una tendencia no lineal como se muestra en el gráfico 3b, donde al variar no-solo la altura de la capa de relleno, sino y su diseño general (ancho, ancho de taludes, etc), cambian las magnitudes de los esfuerzos en cada punto de cálculo de la capa base, así como y las magnitudes del asentamiento total.

Un análisis detallado de los T_{max} en todo el perfil, es recomendado para estimarla estabilidad por cortante de la Obra. Conociendo el parámetro T , que representa la resistencia cortante máxima del suelo, se pueden establecer zonas donde los T_{max} sobrepasan los valores permisibles e identificarlas como inestables. A partir del rediseño de la Obra se pueden variar los T_{max} , llevándolos a valores dentro de los intervalos permisibles. Es importante destacar que estableciendo particularidades en la conformación del dique, durante la fase constructiva, es posible mantener los T_{max} por debajo del valor permisible de T .

Nota Final

Considerando los aspectos citados, el análisis de los esfuerzos generados sobre la capa de suelo y su relación con los elementos del diseño de las Obras es una cuestión esencial para su proyección sobre

suelos blandos. La heterogeneidad de las condiciones de yacencia de estos suelos, de sus espesores y de sus propiedades físico-mecánicas, hacen que se tenga en cuenta una amplia diversidad de condiciones en un mismo Proyecto, y que el pronóstico de procesos y fenómenos físico-geológicos sea aún más representativo.

Los criterios analizados muestran algunas de las direcciones que se deben tomar para durante la proyección de este tipo de Obras, establecer condiciones de estabilidad, rediseñando de manera óptima el Proyecto o modificando elementos que realmente influyen sobre los parámetros desfavorables de este.

Bibliografía

Juárez Badillo, E. (1975): Mecánica de Suelos. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Edición Revolucionaria, Tomo II: 563 p.

Rubinchtein, A.I. y F.C. Canaev (1984): Investigaciones Ingeniero-geológicas para la construcción sobre suelos blandos. Editorial Stroiisdat, Moscú: 108 p. (original en ruso)

Drosd, P.A. (1971): Metodología para la proyección de Diques de tierra en zonas pantanosas. Instituto de Investigaciones de los Recursos Hidráulicos de Bielorusia, Minsk: 80 p. (original en ruso)

Rocamora Alvarez, E. (1993): Pronostico de asentamiento del Dique Sur de La Habana. Archivo EIPHH. INRH.

Rocamora Alvarez, E. (1994): Metodología para el cálculo y pronóstico de asentamiento y la estabilidad de Diques y Terraplenes en suelos muy blandos. Material inédito

Rocamora Alvarez, E. (1995): Pronóstico de asentamiento de los colchones de grava para la cimentación de tuberías de alcantarillado en una zona de Varadero. Archivo EIPHH. INRH

Gómez Escoubes, R. y J. Devicenzi Pibelti. (1996): Seguimiento de la evolución de asientos para un futuro parque de carbones en el Polígono Industrial de Guadarranque, Cádiz, España. Revista Ingeniería Civil No. 103, Madrid, España: pp 93-100.

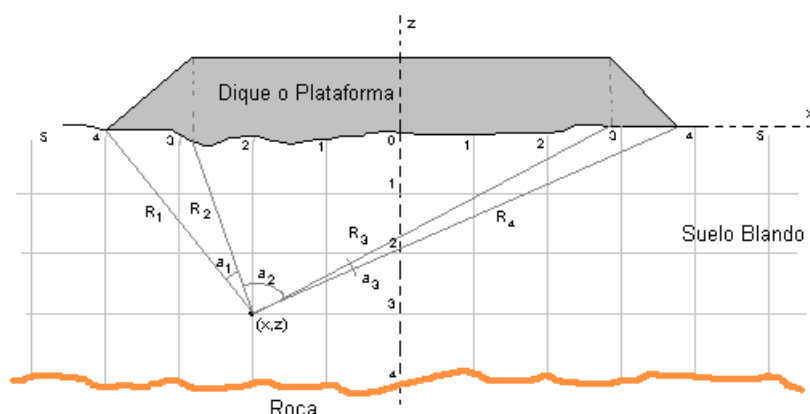
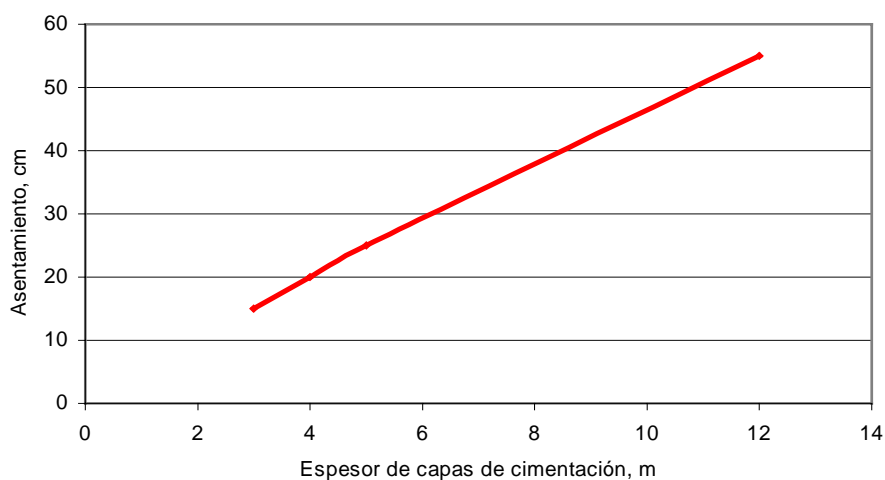


Figura 1- Sección transversal de la Obra proyectada y la base de cimentación con la red de puntos para el cálculo.

a).



b).

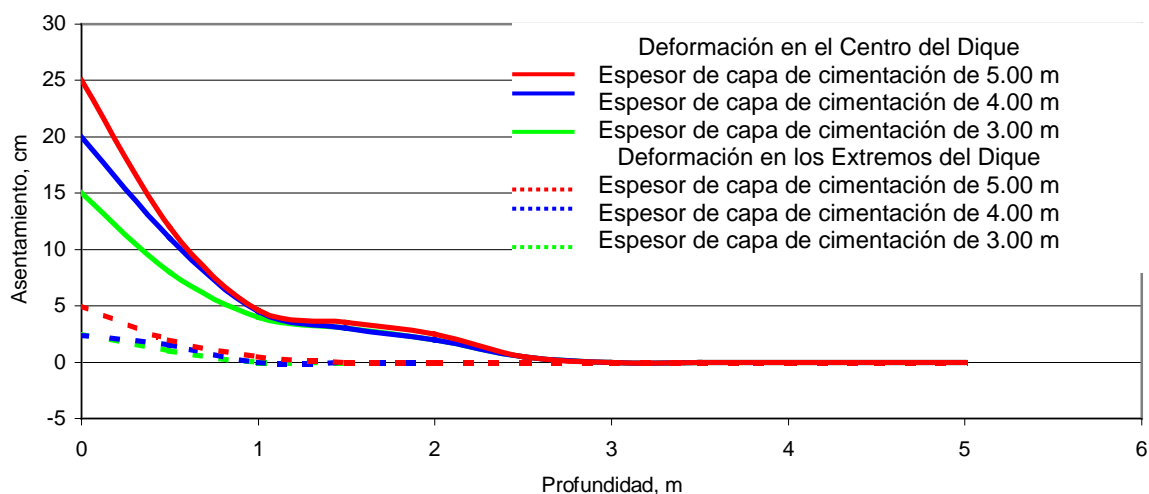


Figura 2- Tendencia de la relación Asentamiento-Espesor de capa de suelo blando (a) y relación Profundidad-deformación (b).

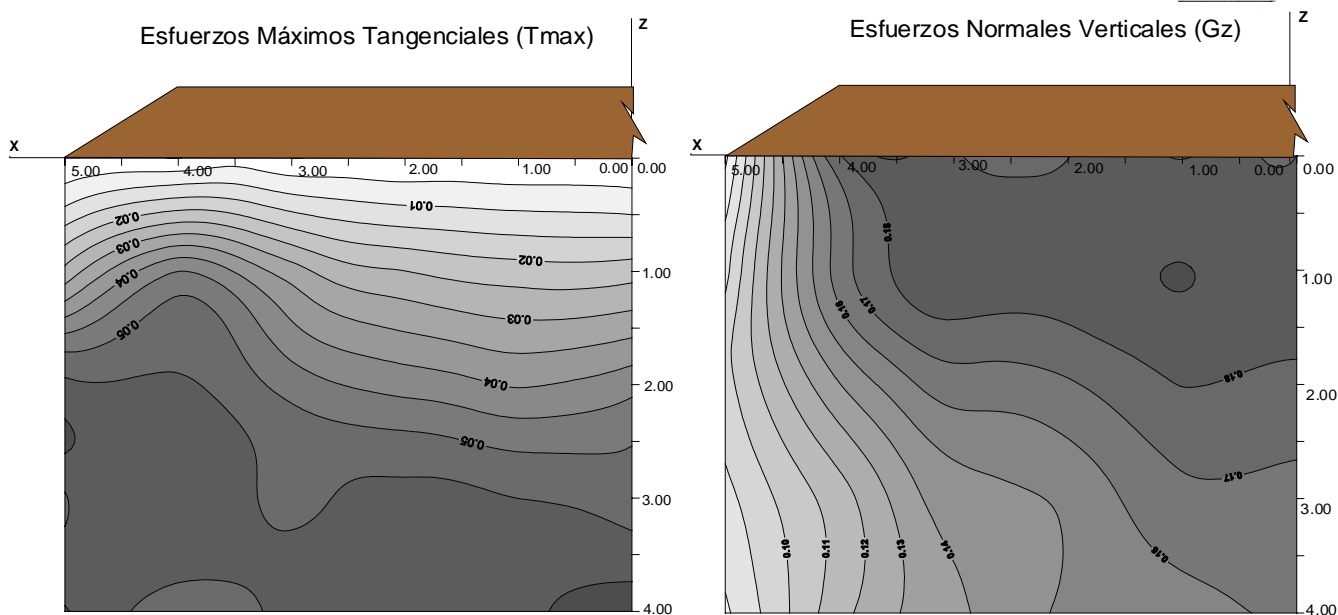


Figura 3a- Distribución de los Tmax y Gz para una plataforma de 10m de ancho y 1 m de altura

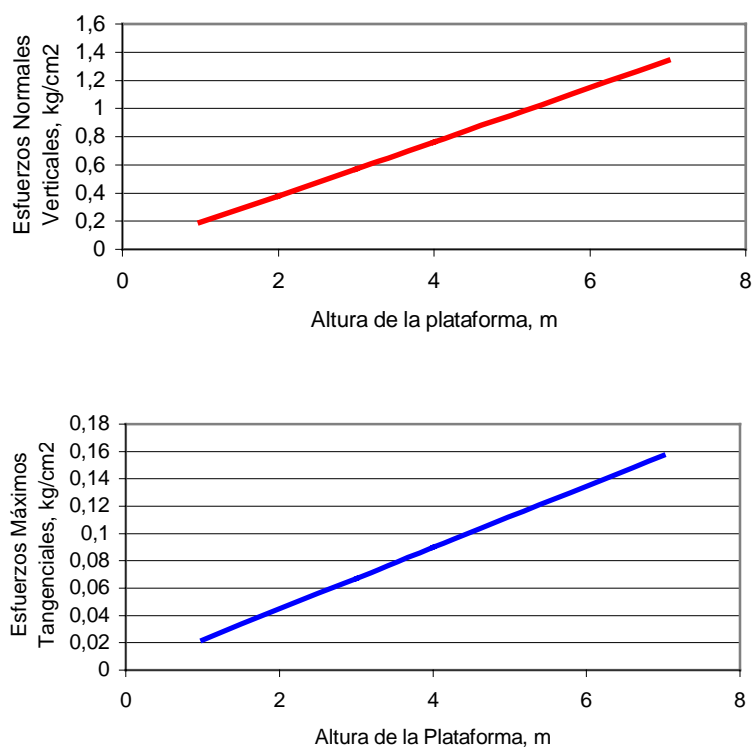


Figura 3b- Relaciones principales entre la altura del Dique, como parámetro de diseño, y las magnitudes de los esfuerzos máximos tangenciales y normales verticales, generados.



CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA DEL DEPOSITO ORO BARITA CON EL USO DE TESTIGO DE PERFORACION

M.Sc. Rafael Falero Salgado⁽¹⁾, Ing. Antia Luna Vázquez⁽²⁾, Ing. María C. Ferrer Texidor⁽²⁾

(1) OTRM Stgo de Cuba , Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney , geominstgo@stg.minbas.cu

(2) Geominera de Oriente Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney , geominstgo@stg.minbas.cu

RESUMEN

A fin de lograr una optima utilización de la existencia de una gran cantidad de testigos de perforación ejecutados en la investigación de la viabilidad para la explotación de un deposito mineral a cielo abierto, se propone un sencillo y practico procedimiento para la rápida inspección de los testigos, al objeto de llevar a cabo una evaluación geotécnica del área de estudio, este procedimiento simplificado reduce el tiempo requerido para la evaluación de los testigos, normaliza la información con objetivos geotécnicos prácticos de los mismos , como resultado se logra un mayor volumen de información de las perforaciones.

Se ha tenido en consideración que este método propuesto puede ser más amplio en cuanto a la cantidad de información que se puede levantar de los testigos, pero no se ha realizado así totalmente, con el objetivo de no variar el método establecido de la elaboración de la información Ingeniero Geológica ya existente y aprobado.

Este método permite dar una evaluación del macizo rocoso mucho mas amplia y que no se brinda por la actual metodología Ingeniero Geológica que se utiliza para la investigación de yacimientos.

El método, recoge y evalúa datos que caracterizan el macizo rocoso y que serán utilizados en el cálculo de parámetros técnicos que determinaran el equipamiento minero.

INTRODUCCIÓN

En los trabajos ingeniero geológicos para la evaluación de un yacimiento mineral se realiza un volumen considerable de perforaciones, las cuales son documentadas y sin embargo como resultado de ello no se brinda una evaluación integral del macizo, y por tanto no facilita los datos primarios preliminares elementales, para la proyección de los trabajos mineros. La práctica actual ha demostrado que los métodos utilizados son anticuados y la necesidad de aplicar tecnologías de evaluación más fáciles en su manejo, economía y alto rendimiento se introduzcan en la práctica y este es el caso de los métodos evaluativos geomecánicos.

MATERIALES Y METODOS.

A partir del RQD (Rock Quality Designation) , índice de calidad simple propuesto por Deere et al (1963), obtenido de la recuperación de testigo en sondeos se estableció el perfil geotécnico de Oro Barita, al considerarse la naturaleza intrínseca de la roca. La fácil obtención de este índice, motivo su aplicación en la caracterización de la roca, y en conjunto con la evaluación por el grado de dureza, de intemperismo y de diaclasado se logró establecer la caracterización por zonas geotécnicas de todo el área investigada del depósito, esta evaluación es volumétrica por lo que en cualquier punto dentro del área podemos conocer con que calidad de roca nos vamos a encontrar, además de poder calcular los parámetros de calidad, para el reajuste de la potencia de los explosivos o de la potencia de los equipos necesarios o del rendimiento que pueda tenerse en dependencia del sector donde se proyecte trabajar.

Para poder realizar un trabajo evaluativo de la roca se procedió a elaborar una metodología para la organización y recopilación de la información que se documenta en los testigos, elaborandose una tabla que recogiera la siguiente información y en el siguiente orden. Tabla 1

Tabla1

Se documentan los índices señalados más abajo.				
Intervalos	Según los intervalos de perforación.			
Descripción de los testigos	Características Ingeniero Geológicas			
Recuperación	Perforado (metros)	Recuperado		%
RQD	Segmentos con longitud mayor de 10 cm.		%	
Clase	RQD desde 1 hasta 5 según Deere y Miller			
Intemperismo	AM desde 1 hasta 5 Clasificación según Intemperismo			
Dureza	Según su delesnabilidad			
Carácter de las grietas	Según las paredes	Según Separación	Según Relleno	Cantidad grietas

Para vaciar la información se preparó el siguiente modelo con el siguiente formato que recoge los parámetros descritos más arriba. Tabla No 2

Tabla No 2 Zona Barita

No. Pozo: 617 Latitud _____ Profundidad: 40.0 m
 Diámetro: NW-NQ Longitud _____ Sistema Perforación: Doble tubo
 Angulo: 90° Elevación _____

Inter v.	Descripción	Recuperación			Índice RQD			Descripción Clase	Intemp	Dureza	Carácter de las Grietas			
		Perf. (m)	Rec. (m)	%	CM	%	Inter v.				Seg/ Pared de las grietas Abiertas	Según Separ. G. Abier	Relleno Grietas cerradas	Cant. GxM
0.0-3.0	Material intemperizado. De 0.0 – 0.46 m es de color gris pardusco. De 0.46 – 3.0 m cambia la tonalidad a gris amarillento.	3.0	1.20	40	0	0	-	RQD - 1	AM- 5	Deleznable.	-	-	-	-
3.0-4.50	Toba de color gris verdoso amarillento, alterada, argilitizada, sericitizada.	1.5	1.0	67	43	29	<u>0-30</u> 3	RQD - 1	AM- 5	Deleznable.	R. O	SA-4	ER-1 PR-4	20
4.50-6.0		1.5	1.1	73	27	18	<u>0-30</u> 2	RQD - 1	AM- 5	Deleznable.	R. O	SA-4	ER-1 PR-4	
6.0-7.5		1.5	1.45	97	77	51	<u>0-30</u> 3 <u>31-60</u> 1	RQD - 3	AM- 5	Deleznable.	R. O	SA-4	ER-1 PR-4	

Para la realización del trabajo también se requirió capacitar a los especialistas que laboraban en el trabajo de documentación de los testigos en el campo y su procesamiento posterior,

Las consideraciones en cuestión, son el resultado de un estudio detallado de una gran parte de toda el área de investigación en la Zona de Barita, de un análisis de observaciones de determinados intervalos de testigo de perforaciones de sectores de depósito.

Para ello se prestó especial atención a las discontinuidades geológicas, no solo su emplazamiento y separación sino también sus características físicas ó grado de abertura (abierta, cerrada), la homogeneidad del perfil (plano, ondulado ó irregular) y la textura superficial (pulida, lisa ó rugosa) y su valoración numérica, factores importante en la posterior determinación del comportamiento del macizo rocoso.

El campo menífero Barita se ubica dentro de una estructura vulcano - tectónica relacionada a las fuentes de mineralización hidrotermal filoneana y polimetálica, por lo que sus características y propiedades van a corresponder a la de un macizo rocoso ígneo.

El área en cuestión esta constituida por rocas vulcanógenas, vinculadas a la intensa actividad volcánica que caracterizo a esta región, estando constituidas las rocas por tobas andesíticas de diferentes granulometrias.

Las tobas andesíticas presentan diferentes niveles de alteración que van desde la facie clorita sericita hasta cuarzo clorita sericita siendo mas acusado en las zonas de agrietamiento y actividad hidrotermal. Estas características hacen que las propiedades de las rocas sean relativamente bajas, lo cual se infiere al macizo rocoso.

Del procesamiento de la información realizada, la cual fue superior a los 2200 m de longitud de testigos, se determinó la calidad de la roca en cada pozo y para el perfil, 0 + 75 W los cuales se muestran en la tabla No3

Es importante indicar que aún en los trabajos ingeniero geológicos actuales, no se recoge información completa sobre el agrietamiento,

RELACION “RQD/CALIDAD DE LAS ROCAS” EN EL PERFIL 0 + 75 W

Tabla 3

Indice RQD	Calidad de la roca	POZO 617		POZO 618		POZO 619		POZO 620		POZO 621		POZO 622		POZO 647		Total Perfil	
		m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
0– 25 RQD1	Muy mala	6	15	8	19	11	21	8	12	8	11	0	0	0	0	39	11
26–50 RQD2	Mala	3	7	10	26	4	9	0	0	10	15	3	4	2	7	33	9
51–70 RQD3	Regular	15	38	12	30	7	15	17	27	18	26	17	20	1	7	87	24
71–90 RQD4	Buena	12	30	4	11	15	30	16	27	15	22	20	24	5	22	88	24
91-100 RQD5	Exce- lente	4	10	6	14	13	25	21	34	18	26	43	52	13	64	118	32
		40		40		50		62		69		83		21		365	100

De lo cual podemos concluir, que la roca del área analizada, tiene su calidad, con características medias entre Regular - Bueno, por lo que los taludes de la cantera, pudieran tener un ángulo de talud por lo general entre 45 - 55 grados en la parte superior del depósito y mas amplio hacia las zonas de mejor calidad.

De los datos procesados por ejemplo en el perfil 0 + 75 W se determinó que en el perfil existen dos zonas geotécnicas, la Zona geotécnica I, la parte superior, del depósito, que tiene por ejemplo límite inferior, por el pozo 619 a la profundidad de 32 metros, en el pozo 618 a los 40 metros y en el pozo 617 a los 26 metros y así sucesivamente, la Zona Geotécnica II las áreas por debajo de los límites inferiores señalados y está compuesta por las mejores calidades de rocas.

CONCLUSIONES

Se logró realizar una caracterización completa detallada de la calidad de las rocas del depósito y brindar a los proyectistas y operadores de la futura mina los parámetros para, la proyección de la mina y el calculo de la potencia de los equipos mineros.

El operador tiene la posibilidad de saber con antelación, así como recalcular, la calidad de las rocas, para cada área que le sea de interés, para el cálculo de los pasaportes de voladura, cuando así lo requiera o para estimar como se comportaran los taludes por el tipo de roca que tendrá en un momento dado.

Se requiere de la capacitación de los recursos humanos que trabajan en la parte ingeniero geológica en los proyectos de investigación.

BIBLIOGRAFIA.

- Ayala, F.J. (1991): La Ingeniería Geológica. ITGE Madrid
- Haines A, (1994): Appropriate Geomechanical Procedures Applied to Rock Engineering, IV CSMR / Integral Approach to Applied Rock Mechanic Stgo de Chile.
- Hoek, E y E Brown (1985): Underground excavation in Rock. Mc Graw-Hill Book USA.
- ITGE (1992): Manual de Taludes. Tipología y Desarrollo de los movimientos. ITGE, Madrid España.
- ITGE (1991): Mecánica de Rocas Aplicada a la Minería Metálica. ITGE, Madrid, España.
- Romana, M. (1994): Clasificación de macizos rocosos para excavación de túneles, Ingeopress No18.
- Romana, M. (1994): Practice of SMR classification for slope appraisal. Politechnical University of Valencia, Spain.
- Romana M. (1997): El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de los taludes. IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables.
- Stagg- Zienkiewicz (1970): Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica. Editorial Blume.
- Serrano A. (1994): Resistencia y deformabilidad de las diaclasas. Curso sobre geotécnia de obras lineales CEDEX, Madrid.
- Toyos, J. Taboada, J., Lombardero, M. (1994): Estudio de Discontinuidades en yacimientos de Roca Ornamental. Boletín Geológico y Minero. Vol. 105-1, 110 –118.

EVALUACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LOS CAYOS DEL ARCHIPIELAGO CUBANO

Enrique D. López Infante⁽¹⁾ Raul Santander Pozo⁽²⁾ y José A. Estapé⁽³⁾

(1 y 2) Unión de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, Virtudes # 680, esq a Belascoain, Centro Habana, Ciudad de la Habana, Cuba, C. Electronico: uiphc@ceniai.inf.cu

(3) Oficina Nacional de Recursos Minerales, Carlos III, entre Oquendo y Soledad, Centro Habana, Ciudad Habana, Cuba. C. Electronico: estape@onrmmmbas.cu

RESUMEN

El archipiélago cubano está formado por numerosos cayos e islotes de distintas dimensiones y de características hidrogeológicas diferentes, en algunos se ha investigado la posibilidad de extraer las aguas subterráneas dulces para el abasto. Desde hace varios años en los cayos se ha comenzado el desarrollo de la industria turística, con la instalación de zonas hoteleras, en Cayo Coco, Cayo Largo, Cayo Guillermo y otros, pero ha sido en Cayo Largo donde por más de 15 años, la solución de abasto al turismo se ha realizado a partir de las aguas subterráneas. En la gran mayoría de los cayos e islotes, la posibilidad de explotación de los recursos de las aguas subterráneas es limitada por su extensión y por sus condiciones de alimentación. Los recursos de las aguas dulces se encuentran en equilibrio con las aguas saladas del mar, y cuando este se rompe, se produce el ascenso de la zona de interfaz hacia las captaciones. El tipo de captación de las aguas subterráneas, con sus características constructivas y régimen de extracción es la base fundamental para la explotación del acuífero de las aguas dulces. Para la realización de los estudios hidrogeológicos de las pequeñas islas y cayos, no existe, hasta el momento, una metodología específica que defina la manera en que deben orientarse las investigaciones. Los métodos de investigación, que son aplicados con frecuencia para los estudios hidrogeológicos de las denominadas "cuencas abiertas al mar", no se pueden extrapolar al caso de los cayos, los que tienen condiciones particulares. El presente trabajo, expone las características particulares en la evaluación de las aguas subterráneas dulces en los cayos situados en las áreas de plataforma, con la cual es posible determinar el volumen de los recursos hídricos, y el tipo de captación más adecuada para la explotación del acuífero. Por esta razón, la aplicación de estas recomendaciones constituye un ejemplo para otros cayos e islas pequeñas con características similares a Cayo Largo.

ABSTRACT

Cuban Archipelago is formed by several keys of different dimensions and different hydrogeological characteristics. In some of them it has been researched the possible extraction of fresh underground waters for water supply. Since some years ago in keys has begun the development of touristic industry with the installation of zones relating to hotels as in Cayo Coco, Cayo Largo, Cayo Guillermo and others, however, it has been in Cayo Largo where for more than 15 years the solution of water supply assigned to tourism has been performed with the use of underground waters. In the majority of keys and small islands the possibility of exploitation of underground waters is limited because of its extension and conditions for increasing. Fresh water resources are in balance with salty waters from the sea, and when it breaks down, takes place the raising of the interface zone to the catchment zone. The type of catchment of underground waters with constructive characteristics and extraction regime is the principal base for the exploitation of the water bearing of fresh water. In order to perform the hydrological studies of keys and small islands, until this moment there is not a detailed methodology that determines the manner to guide researches. Research methods frequently applied in the hydrogeological studies of the named "open to the sea basins" can't be extrapolated to keys since they have particular conditions. This work explains the particular characteristics in the evaluation of underground fresh waters in keys located in areas of the platform, and it is possible to determine the volume of hydraulic resources and the more appropriate type of catchment for the exploitation of the water bearing. Taking into account all these considerations, the application of these recommendations is an example to other keys and small islands that present similar characteristics to Cayo Largo as Cantiles, Rosario and others.

INTRODUCCION

El estudio de la hidrología subterráneas de las pequeñas islas y cayos, es un tema de actualidad y en fase de desarrollo. En la gran mayoría de los cayos y las pequeñas islas, la posibilidad de explotación de los recursos de las aguas subterráneas está limitada por su extensión y por sus condiciones de alimentación. Los recursos de las aguas dulces se encuentran en equilibrio con las aguas saladas del mar, y cuando este se rompe, se produce el ascenso de la zona de interfaz hacia las captaciones. La extracción de los recursos hídricos y la contaminación ambiental constituye uno de los problemas a resolver. El tipo de captación de las aguas subterráneas, con sus características constructivas y régimen de extracción, es la base fundamental para la explotación del acuífero de las aguas dulces. Para la realización de los estudios hidrogeológicos de las pequeñas islas y cayos, no existe, hasta el momento, una metodología específica que defina la manera en que deben orientarse las investigaciones. Los métodos de investigación, que son aplicados con frecuencia para los estudios hidrogeológicos de las denominadas "cuencas abiertas al mar", no se pueden extrapolar al caso de los cayos, los que tienen condiciones particulares. Por esta razón, constituye un objetivo principal encontrar una metodología de investigación para la evaluación de los recursos y las reservas de las aguas subterráneas en las pequeñas islas y cayos.

El presente trabajo, representa una metodología de investigación de las pequeñas islas y cayos situados en las áreas de plataforma, con la cual es posible determinar los diferentes tipos de estudios, el tiempo necesario para la realización de la regionalización hidrogeológica y la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas. Se han realizado estudios específicos, los cuales se pueden considerar como ejemplos para las investigaciones de los cayos y las pequeñas islas, dentro de los cuales se encuentran el estudio de los efectos de las mareas oceánicas, la determinación de la velocidad de filtración en las rocas, y la observación del régimen de trabajo en las captaciones, entre otros. Las investigaciones que se presentan, pueden servir como ejemplo para su aplicación en otros cayos del archipiélago cubano.

El archipiélago cubano está formado por numerosos cayos de distintas dimensiones y con características hidrogeológicas diferentes, y en algunos se ha investigado la posibilidad de extraer las aguas subterráneas dulces para el abasto. En los cayos se ha comenzado desde hace varios años el desarrollo de la industria turística, con la instalación de zonas hoteleras, como por ejemplo: Cayo Coco, Cayo Largo, Cayo Guillermo y otros, pero ha sido en Cayo Largo donde por más de 15 años la solución de abasto al turismo se ha realizado a partir de las aguas subterráneas.

MATERIALES Y METODOS

En general, las aguas subterráneas dulces en Cayo Largo del Sur, están propagadas en todos los tipos de sedimentos presentes en el área, y las mismas se encuentran en las distintas formas del relieve atravesadas por todos los pozos y calas; las aguas yacen en los depósitos friables del Cuaternario, con la existencia de un primer acuífero el cual se encuentra bajo la influencia del mar. Por otro lado, existen sedimentos pantanosos, en los cuales se encuentran las aguas saladas. La profundidad de yacencia de las aguas subterráneas varía de 5 a 6 m en las dunas más altas, disminuyendo al acercarse a la zona pantanosa, donde prácticamente afloran en la superficie del terreno. La distribución de las características geológicas determina las condiciones de yacencia de las aguas subterráneas. Como resultado de ello, existen dos horizontes acuíferos: un primer horizonte representado por las arenas oolíticas, con un espesor que varía desde 0 hasta 15 m. En este acuífero, se encuentran las aguas dulces, las cuales son extraídas para el abasto mediante sistemas de captación horizontal, como son las trincheras y los drenes soterrados. Por debajo de este acuífero se extiende el horizonte de las calizas altamente carsificadas, donde se encuentran las aguas con mineralización de 35 g/L. Este horizonte acuífero es utilizado en la extracción de las aguas para el abasto a las plantas desalinizadoras y a las piscinas, así como también para la recarga pluvial.

Las mareas oceánicas tienen una gran influencia en la variación de los niveles en el acuífero y en la zona de interfaz entre las aguas dulces y las aguas saladas. Para ello, se estudió el régimen de las mareas en dos horizontes acuíferos: en las calizas carsificadas y en las arenas oolíticas. La influencia de la marea en estas rocas carsificadas tiene una relación directa con las fluctuaciones del mar, la amplitud tiene muy poco amortiguamiento, y la eficiencia de marea en las calas puede ser hasta de 0,50 m, con un tiempo de retardo desde 1 hasta 2 h. La comunicación con el acuífero se encuentra a 200 m de la

costa, en el borde del talud insular.

En Cayo Largo, existen numerosas lagunas de agua dulce, las que representan el afloramiento de las aguas subterráneas, estas se asocian a las áreas tectónicas y están alineadas según la orientación de las estructuras. También se pueden observar lagunas de agua salada en el interior del cayo, las que pueden alcanzar a veces una mineralización total superior a 35 000 mg/L, como resultado de la evaporación de la superficie hídrica.

La formación de las aguas subterráneas se realiza principalmente a partir de la infiltración de las precipitaciones atmosféricas. Con la ocurrencia de las lluvias, los niveles del acuífero se elevan de forma inmediata, con un tiempo de retardo menor de 2 h, como consecuencia de la alta permeabilidad de los suelos arenosos. El área de alimentación del acuífero es a la vez de circulación y descarga, debido a las características de los depósitos de cobertura y a las dimensiones del cayo. Las aguas infiltradas en el acuífero son evacuadas de forma predominantemente vertical a través de las calizas carsificadas, las que subyacen al horizonte de las rocas oolíticas, en un tiempo que está en dependencia de la magnitud de las precipitaciones, como se puede apreciar en la fig 3. Con la ocurrencia de las lluvias, se produce la elevación inmediata de los niveles en el acuífero; se ha podido apreciar, que los volúmenes infiltrados no se acumulan en el acuífero, sino que se descargan rápidamente en varios días. La velocidad de descarga del acuífero está en dependencia de la magnitud e intensidad de las precipitaciones, y como promedio es de 4 cm/d, como puede verse en la fig 2.

Las consideraciones en la determinación del límite entre las aguas dulces y las aguas saladas en las islas oceánicas pueden ser aplicadas para el caso de los cayos, y en particular, para las condiciones hidrogeológicas de Cayo Largo del Sur. Se ha determinado, en general, que en el horizonte de las rocas oolíticas se encuentran las aguas dulces, las que forman un bolsón, que yace en equilibrio con las aguas saladas del mar, por debajo se encuentran las calizas carsificadas intrusionadas por las aguas del mar. La profundidad entre las aguas dulces y las aguas saladas se ha medido en base a las observaciones realizadas en los pozos y las calas destinados para batimetría y salinimetría. Por la reinterpretación de las investigaciones geofísicas (S.E.V.), se ha determinado el espesor de las aguas dulces en base al contraste de resistividad entre las capas de agua dulce y las capas de agua salada. Las capas con agua dulce tienen una resistividad de 60 a 150 Ω -m, las capas de agua salada tienen una resistividad menor de 10 Ω -m, y las arenas sin agua tienen una resistividad de 500 a 1 000 Ω -m como se puede ver en la figura 4. Las áreas con la presencia de las aguas dulces, determinadas por los resultados de S.E.V., coinciden con las zonas donde las cotas de los niveles de las aguas subterráneas se encuentran por encima del nivel del mar, en todo momento (considerando el efecto de las mareas), y donde la salinidad total de las aguas subterráneas no excede de 1 g/L de sales solubles totales. Por otro lado, se ha determinado la presencia de aguas dulces con un espesor mayor de 5 m, a 50 m de la costa, las que pueden representar descargas submarinas. De la misma manera, se ha podido observar la presencia de arenas oolíticas intrusionadas con agua de mar, en las cuales debía existir agua dulce. Según los resultados de las calas perforadas, en esta parte se observan depósitos pantanosos y arenas arcillosas; además, es un área donde se encuentran numerosas lagunas de agua salada, las que pueden influir en la salinidad del acuífero. Las mayores profundidades de las aguas dulces se encuentran en la parte central del cayo, con un espesor de 15 m, y en la parte sur con un espesor que varía de 5 a 8 m, coincidiendo con las cotas más elevadas de los niveles de las aguas subterráneas.

Las características del medio poroso, representan la base fundamental para la determinación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas y el pronóstico de los descensos teóricos en las obras de captación propuestas. El estudio de las condiciones geológicas, ha determinado que la composición litológica del acuífero de las aguas dulces está formado por oolitas carbonatadas con dimensiones de 0,1 a 1 mm cementadas por calcita. Esta composición de las rocas tiene una distribución en general homogénea, la cual se aproxima a los requerimientos de la ley de Darcy para el flujo de agua en los medios porosos. De esta manera, es posible aplicar, con cierta validez, los esquemas de cálculo que están establecidos para estas condiciones, y que han sido ampliamente utilizados. En las investigaciones anteriores, se calcularon los parámetros del acuífero sobre la base de las pruebas de bombeo realizadas en calas y pozos, en régimen permanente e impermanente; sin embargo, los resultados que se han obtenido de la permeabilidad y porosidad efectiva no reflejan exactamente las características del medio poroso, ya que en algunos casos son atravesados dos horizontes acuíferos con diferente litología. Por consiguiente, se determinó que las características del medio poroso debían de obtenerse a partir de las pruebas de caudal realizadas en las fuentes de abasto existentes, que es donde realmente se realiza la extracción de

las aguas subterráneas. Durante el proceso de bombeo, en las captaciones se determinaron los niveles dinámicos, el caudal de extracción y las dimensiones de las trincheras, realizando los cálculos de los parámetros del acuífero por la fórmula de Numerov-Pascua. Las arenas oolíticas pueden clasificarse como depósitos sedimentarios de granulometría homogénea y gran porosidad, debido al poco material cementante.

De acuerdo con los resultados de los análisis granulométrico, el mayor contenido del material corresponde a arena fina (90 %) el cual coincide con los resultados de los parámetros hidrogeológicos calculados por las fórmulas utilizadas. La permeabilidad varía desde 1 hasta 5 m/d y la trasmisividad de 10 a 50 m²/d. El valor más representativo del coeficiente de almacenamiento (μ), calculado a partir del balance hídrico, es de 0,10 ó 10 % de porosidad efectiva. Además de la porosidad intergranular presente en las arenas oolíticas, es necesario señalar la existencia de una porosidad secundaria debido al fracturamiento de las rocas y al carso en la parte superior del corte, con la presencia de numerosas grietas y cavernas con dimensiones hasta de 10 cm. Estas características son posibles de apreciar a todo lo largo de la franja litoral al sur del cayo, donde se observa la presencia de diaclasas, las cuales caen en forma de lajas como resultado de los procesos erosivos. Como se puede ver en la foto 1.

Durante el paso de los ciclones, huracanes y ondas tropicales, se producen las inundaciones en las partes bajas del cayo, debido a las intensas lluvias y al remanso de las aguas subterráneas, pero estas condiciones se mantienen durante un corto período de tiempo, hasta que se produce la descarga. En ese instante, el régimen del acuífero entra en equilibrio con las mareas oceánicas y disminuye completamente la circulación del flujo subterráneo. Los gradientes del flujo subterráneo, determinados para el período seco, varían de 3×10^{-4} a 4×10^{-4} , como se ha podido observar en los mapas de hidroisohipsas, la superficie freática es prácticamente horizontal. Al mismo tiempo, la permeabilidad del horizonte acuífero varía de 1 a 5 m/d, la cual es relativamente baja; con estas condiciones, prácticamente no se produce la descarga del acuífero.

En la generalidad de los casos, la extracción de las aguas subterráneas desempeña un papel principal en la descarga del acuífero; sin embargo, en el caso de los cayos, el comportamiento es diferente. Debido a ello, cuando se realiza la extracción de las aguas subterráneas, no se produce una disminución regional perceptible de la superficie freática en el acuífero, los niveles dinámicos descienden en el área de influencia de las captaciones y varían con las oscilaciones del nivel medio de marea. De este modo, lo que se produce es una ascensión de la zona de interfaz en el área de la captación, la cual estará limitada por la cota del nivel dinámico con respecto a la posición media del nivel del mar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de los recursos de las aguas subterráneas con la cantidad y calidad requerida, constituye la tarea fundamental de una investigación hidrogeológica regional. Hasta el momento no existe una metodología para la evaluación de los recursos en estas condiciones particulares; por esta razón, la aplicación de estas investigaciones puede servir como ejemplo para otros cayos e islas pequeñas con características similares a Cayo Largo, como por ejemplo: los cayos Cantiles, Rosario, Avalos y otros. La valoración regional de las condiciones hidrogeológicas, ha permitido calcular los recursos de las aguas subterráneas, así como el tipo de captación más adecuada para la extracción de las aguas dulces. La evaluación de los recursos y las reservas podrá ser precisada con la puesta en funcionamiento a largo plazo de las captaciones propuestas, ya que la verdadera magnitud de los recursos de explotación, podrá ser determinada con la experiencia práctica.

El cálculo de los recursos de explotación de las aguas subterráneas se realizó por el método de balance, cuya ecuación general tiene la siguiente expresión:

$$Q_e = \alpha_1 Q_n + \alpha_2 \frac{V_n}{t} + \alpha_3 Q_a + \alpha_4 \frac{V_a}{t} + Q_{inc}$$

donde:

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ y α_4 : coeficientes de utilización de los tipos de reservas y recursos.

Q_n y Q_a : recursos naturales y artificiales.

V_a y V_n : reservas naturales y artificiales.

Q_{inc} : recursos incorporables.

t : tiempo de cálculo para la utilización de las reservas naturales y artificiales.

Q_e : recurso de explotación.

En las condiciones de los cayos solamente existen recursos naturales y reservas naturales, por lo que la ecuación se simplifica, quedando de la siguiente forma:

$$Q_e = \alpha_1 Q_n + \alpha_2 \frac{V_n}{t}$$

De esta manera, durante el período húmedo y cuando se produzca la ocurrencia de precipitaciones, se podrán extraer los recursos naturales, y en el período seco, sólo se podrán extraer las reservas naturales.

Cálculo de los recursos naturales

Por los resultados obtenidos del balance de la capa del suelo, han sido determinados los coeficientes de infiltración para las diferentes probabilidades en las precipitaciones.

El cálculo se realizará a partir de la siguiente expresión:

$$Q_n = \frac{K_i \cdot P_{\%} \cdot A}{t}$$

donde:

K_i : coeficiente de infiltración para la probabilidad de la lluvia (adimensional).

$P_{\%}$: lluvia con la probabilidad de cálculo (en mm).

A : área determinada por el contorno de propagación de las aguas dulces (en m²).

t : tiempo (en d).

El cálculo de los recursos de explotación de las aguas subterráneas, se determina de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q_e \leq \alpha_1 Q_n + \alpha_2 \frac{V_n}{t}$$

Para los cálculos se ha escogido el coeficiente $\alpha_1 = 0,3$, el cual representa el 30 % del volumen de las precipitaciones infiltradas. De esta manera, quedaría un 70 % del volumen total infiltrado, del cual, un 30 % compensaría las reservas naturales extraídas, y el resto (40 %), es el volumen que se descarga de diferentes formas fuera del acuífero.

$$Q_e \cong 0,3 Q_n + 0 \frac{V_n}{t} = 0,3 Q_n$$

Cálculo de las reservas naturales

Las reservas naturales son calculadas a partir de la siguiente expresión:

$$V_n = \mu \cdot V_o$$

donde:

V_o : volumen de la capa acuífera (m³).

μ : coeficiente de almacenamiento, para acuíferos libres es igual a la porosidad efectiva (adimensional).

El volumen del acuífero es calculado teniendo en cuenta el mapa de isopacas de agua dulce confeccionado por los datos del S.E.V., las observaciones de la salinometría en las calas, y las cotas de los niveles de las aguas subterráneas en las calas. Con este análisis, se ha determinado, con cierta exactitud, la profundidad entre las aguas dulces y las aguas saladas en el acuífero.

Se consideran reservas naturales a aquellos volúmenes de las aguas subterráneas prácticamente estacionarios, los que ocupan una geometría delimitada exteriormente por el límite de 1 g/L de sales solubles totales.

El cálculo se realizará con la siguiente expresión:

$$Qe \leq \alpha_1 Qn + \alpha_2 \frac{Vn}{t}$$

El aprovechamiento del 10 % de las reservas naturales constituye un volumen importante de los recursos de explotación de las aguas subterráneas durante el período seco.

Rendimiento de las obras de captación

La observación del régimen de trabajo de las captaciones es un elemento más a considerar en la evaluación de los recursos de explotación de las aguas subterráneas en un acuífero. Como parte del conjunto de investigaciones, se realizó un análisis comparativo de todas las trincheras, teniendo en consideración su extracción y la calidad de sus aguas con un período de tiempo prolongado. Al mismo tiempo, se determinó el caudal por unidad de longitud más representativo para las condiciones hidrogeológicas del cayo, así como también, el tipo de captación más adecuada para la explotación de las aguas subterráneas. Como resultado de esto, se estudiaron las características constructivas y de explotación del dren soterrado T-1,2. Esta captación ha funcionado con un régimen de explotación continuo durante 2 años, con un caudal de 388 m³/d, sin la elevación de la mineralización de sus aguas y con un contenido menor de 1 g/L de sales solubles totales.

Cálculo del descenso teórico en los drenes

Para el cálculo, se utiliza la fórmula de Schneebeli para el dren de longitud infinita y el régimen estabilizado, la cual tiene la siguiente expresión:

$$So = \frac{q}{2\pi k} \left[\frac{\pi L}{b} - \ln \left(\frac{2\pi r_d}{b} \sin \frac{\pi a_1}{b} \right) \right]$$

donde:

So : descenso teórico.

q : caudal por unidad de longitud .

k : conductividad hidráulica .

r_d : radio del dren .

b : espesor del acuífero .

a_1 : distancia desde el fondo de la captación hasta el límite del acuífero .

L : longitud de influencia .

El proyecto de captación para la explotación de los recursos debe orientarse de acuerdo al modelo de dren soterrado. En general, como su nombre lo indica, los drenes han sido utilizados fundamentalmente para el drenaje agrícola, y algunas veces para la explotación de las aguas subterráneas. Se ha podido determinar, que este tipo de captación, por sus características, garantiza una distribución constante del caudal a todo lo largo de la línea de drenaje, y al encontrarse enterrado es más difícil la contaminación de sus aguas; además, prácticamente no modifica el entorno natural del cayo. Las trincheras actuales se encuentran prácticamente abiertas, lo que hace que se pueda producir la contaminación de sus aguas, aunque exista una zona de protección sanitaria de régimen estricto de 30 m en todas las captaciones.

Para el cálculo de la longitud total de los drenes, se utiliza la siguiente expresión:

$$L = \frac{Qe}{q}$$

donde:

L : longitud de los drenes (m).

q : caudal por unidad de longitud .

Qe : recurso de explotación (m³/d).

En la actualidad, existen nuevas tecnologías para la construcción de las redes de drenaje de los suelos, las que utilizan fibra textil como filtro, eliminando la colocación de empaques de grava y arena. Este tipo de filtro, denominado **Geotextile**, sustituye al dren francés y a la tubería de drenaje, requiere una excavación más estrecha, y puede diseñarse para cualquier tipo de suelo. En este caso, la aplicación de esta tecnología pudiera realizarse de forma experimental en Cayo Largo del Sur para el abasto de agua subterránea.

Con el desarrollo prospectivo de Cayo Largo del Sur, la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas se agudizará más, si no se toman medidas de control sanitario para evitarla. En su mayoría, las instalaciones hoteleras son construidas sobre el horizonte acuífero de las aguas dulces y alrededor de la zona de alimentación del acuífero. El área de las instalaciones ocupará un ancho de 300 m a lo largo de toda la franja del litoral al sur del cayo, la cual se extenderá desde la zona A hasta la zona B, que es donde precisamente se encuentran los mayores espesores de las aguas dulces. Por otro lado, con el incremento de las construcciones, esta franja ocupará la segunda y la tercera zona de protección sanitaria de las captaciones actuales. Un ejemplo de esto se puede observar en la trinchera T-5, donde a menos de 50 m se encuentra en construcción el hotel "Linda Arena" como se puede ver en la foto 2. Debido a ello, con la situación actual de las trincheras techadas con tejas de fibrocemento, no es posible garantizar totalmente la protección sanitaria de las fuentes. Por esta razón, se recomienda la sustitución de las trincheras actuales por drenes soterrados, con el objetivo de evitar la contaminación. En Cayo Largo existen fuentes potenciales de contaminación del acuífero, como las lagunas de oxidación, las áreas de bombeo de los residuales, y también los lugares donde se vierten desechos.

Conclusiones

- 1.- En los períodos de intensas precipitaciones, la descarga del horizonte acuífero de las rocas oolíticas se produce de forma predominantemente vertical a través de las calizas carsificadas. En los períodos con ausencia de lluvias, no se ha observado la existencia de flujo subterráneo.
- 2.- En el acuífero de las rocas oolíticas no se produce la acumulación de los recursos naturales durante la infiltración de las precipitaciones; estas son descargadas en días, disminuyendo significativamente la salinidad de las aguas subterráneas como resultado del aumento de la profundidad de la interfaz.
- 3.- Las arenas oolíticas tienen una porosidad efectiva que varía de 0,10 a 0,20 y una permeabilidad de 1 a 5 m/d, lo que significa que este acuífero posee relativamente poca capacidad de extracción y un mayor volumen de acumulación de las reservas naturales.
- 4.- La intensa extracción de las aguas subterráneas no es la causa única de la elevada mineralización de algunas trincheras, sino que influyen significativamente sus características constructivas, como la penetración en el acuífero, la cota y el ancho del fondo, la orientación de su eje longitudinal con respecto a las estructuras geológicas, los efectos de las mareas oceánicas, así como su caudal por unidad de longitud.
- 5.- Se ha determinado, por las peculiaridades de Cayo Largo del Sur, que el tipo de captación más adecuada para la extracción de las aguas subterráneas es el dren soterrado, ya que por sus características constructivas se encuentra bajo tierra, es más difícil de contaminar, no altera el entorno natural del cayo, la distribución del caudal a todo lo largo es constante, y disminuye la elevación de la zona de interfaz.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- **Avello, O.** (1983). Estudios geológicos de la plataforma cubana.
- 2.- **Avello, O.** (1983). Sedimentos de la plataforma cubana.
- 3.- **Avello, O.** (1985). Estudios geológicos de la plataforma cubana.
- 4.- **Alcolado, M.** (1996). Proyecto de captación de la trinchera T-1,2, Cayo Largo del Sur.
- 5.- **Alpizar, F. H.** (1986). Informe hidrogeológico sobre las investigaciones realizadas en Cayo Largo.
- 6.- **Babushkin, O.** (1990). Levantamiento geólogo-geofísico en la Isla de la Juventud.
- 7.- **Broderman, J.** (1954). Posibilidades petrolíferas en la plataforma sumergida de la Isla de Cuba.
- 8.- **Bouticaz, P.** (1952). Escape de gas en los cayos de Isla de Pinos.
- 9.- **Caneiro, G.** (1978). Condiciones naturales y explotación turística de Cayo Largo del Sur.
- 10.- **Cruz, T. R.** (1998). Informe ingeniero-geológico de los hoteles Cayo Largo I y II.
- 11.- **Custodio, E. y Llamas, M.** (1978). Hidrología subterránea, tomos I y II.
- 12.- **Duranza, B. A.** (1985). Estimación de la evapotranspiración potencial por el método de Penman, programa de computación "EVABAL".
- 13.- **Framji, K. K.** (1987). Design practices for covered drains in a agricultural land drainage system, India.
- 14.- **Franco, G.** (1975). Las eolianitas del occidente de Cuba.
- 15.- **Fernández, A.** (1996). Programa de computación para el cálculo de los gastos de las trincheras en Cayo Largo del Sur.
- 16.- **Gandarillas, E. J.** (1999). Investigaciones geólogo-geofísicas para el estudio de prefactibilidad ambiental de Cayo Largo del Sur.
- 17.- **González, A.** (1985). Breve introducción al estudio de las captaciones horizontales en Cuba.
- 18.- **Hernández, C.** (1998). Levantamiento geológico y búsqueda de minerales sólidos en el shelf de la Isla de la Juventud.
- 19.- **Iturralde, M.** (1998). Estratigrafía de los cayos del Archipiélago Sabana-Camagüey.
- 20.- **Kiriujin, A. V.** (1987). Hidrogeología regional.
- 21.- **Krumbein, C. W.** (1950). Stratigraphic and sedimentation.
- 22.- **López, E.** (1996). Programa de investigaciones de Cayo Largo del Sur.
- 23.- **López, E.** (1997). Influencia de las mareas oceánicas en Cayo Largo del Sur.
- 24.- **López, E.** (1997). Estudio de la velocidad de filtración de las rocas en Cayo Largo del Sur.
- 25.- **López, E.** (1983). Aprovechamiento de las aguas subterráneas por la explotación de las lagunas.
- 26.- **López, E.** (1998). Estudio de las fuentes de abasto de las aguas subterráneas dulces en Cayo Largo.
- 27.- **López, E.** (1999). Estudio hidrogeológico de la fuente de abasto a la segunda planta desalinizadora en Cayo Largo del Sur.
- 28.- Mapa geológico de Cuba a escala 1:250 000, hoja f 17-10.
- 29.- **Molerio, L. y Plaza, I.** (1997). Las aguas subterráneas en Cayo Largo del Sur.
- 30.- **Montoya, S.** Búsqueda de acumulaciones de arena marina en la plataforma sur de Matanzas.
- 31.- **Oceguera, J. L.** (1991). Abasto a la zona hotelera en Cayo Largo del Sur, interconexión T-7 y T-9.
- 32.- **Paulides, Y.** (1985). Condiciones para la formación de la oolita en las regiones someras de los mares tropicales.
- 33.- **Pizarro, F.** (1985). Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos.
- 34.- **Piñero, N.** (1998). Reinterpretación de las investigaciones geofísicas de la zona B de Cayo Largo.
- 36.- **Pokrishkin, V.** (1963). Búsqueda y reconocimiento de las fosforitas en la República de Cuba.
- 37.- **Pokrishkin, V.** (1964). Informe preliminar sobre la búsqueda de fosforitas en los cayos del Archipiélago de los Canarreos.
- 38.- **Portela, A.** (1991). Mapa geomorfológico de Cayo Estopa - Cayo Largo, a escala 1:50 000.
- 39.- **Roselló, R. y Jachatriam, D.** (1997). Investigaciones geofísicas de la zona A de Cayo Largo.
- 40.- **Rodríguez, E.** (1997). Determinación de la infiltración eficaz en las zonas A y B de Cayo Largo.
- 41.- **Santiago, J. F.** (1999). Tecnología para la remoción de sulfhídrico en Cayo Largo del Sur.
- 42.- **Simeón, F.** (1986). Determinación de la velocidad de infiltración y humedad en Cayo Largo del Sur.
- 43.- **Segura, R.** (1985). Introducción a la Petrografía.
- 44.- **Valdés, A.** (1984). Evaluación de los recursos de las aguas subterráneas dulces en Cayo Largo.
- 45.- **Varios autores,** (del año 1986 al año 1996). Epistolario de Cayo Largo del Sur.
- 46.- **Zuazo, A.** (1986). El Neógeno en Cuba. Unidades Litoestratigráficas.

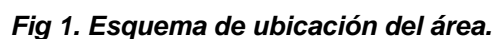




Foto 2. Trinchera sin zona de protección sanitaria (T-5).

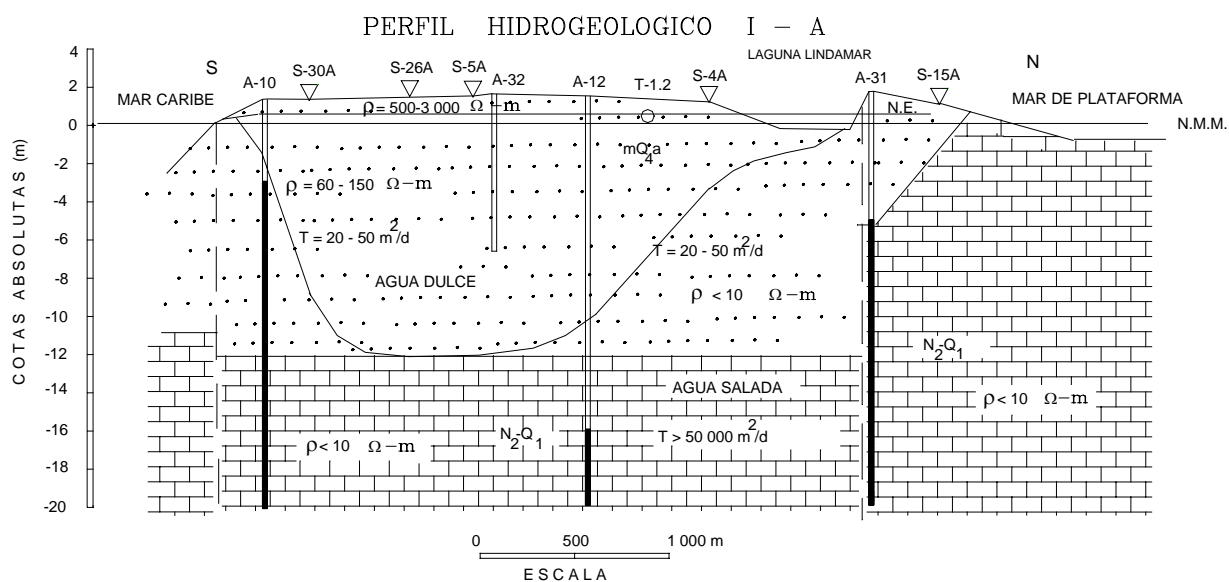


Fig 4. Perfil hidrogeológico con resultados geofísicos.



Foto 3. Arenas oolíticas agrietadas y estratificadas

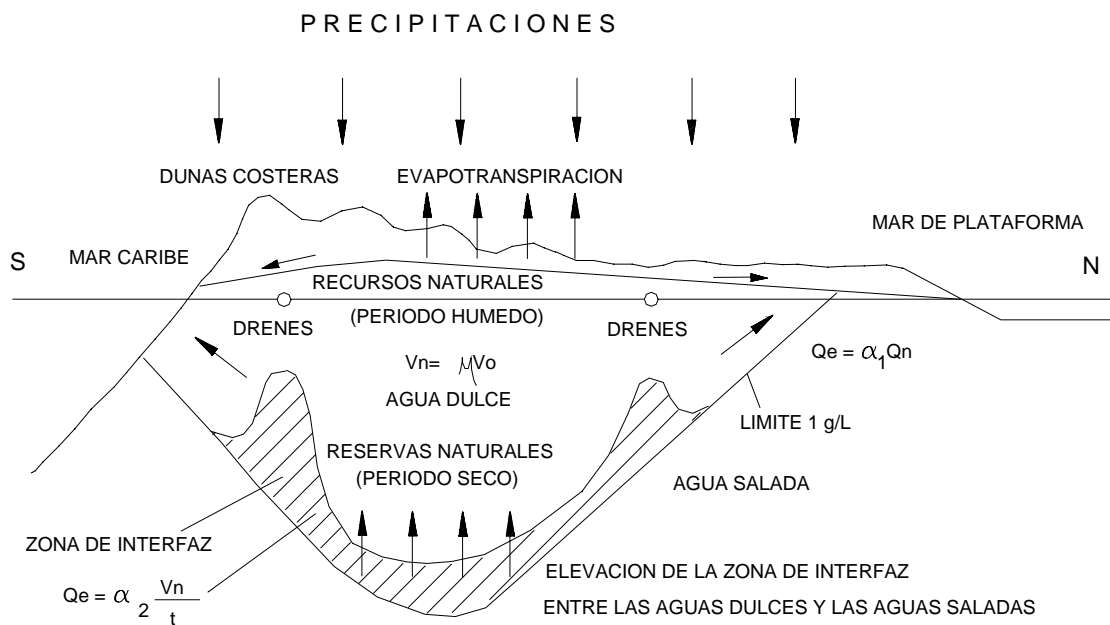


Fig 5. Balance del acuífero en los cayos.



CARACTERIZACIÓN DE AGUAS MINERALES DE ALGUNOS YACIMIENTOS DEL PAÍS.

Clara Melián Rodríguez⁽¹⁾, F. Rebeca Segarte Nario⁽¹⁾, Maritza Pérez Loyola⁽¹⁾, Margaret Suárez Muñoz⁽¹⁾, Patricia González Hernández⁽¹⁾, Juan R. Fagundo Castillo⁽¹⁾, Griselda Benítez Pacheco⁽²⁾.

(1) Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". Ave: 243, No 19815, Fontanar, Municipio Boyeros Ciudad Habana. C.P 19250. E-mail: Patricia@rsrch.isctn.edu.cu

(2) Centro Nacional de Investigaciones Científicas,. Avenida 25 esquina 158. Cubanacán, Municipio Playa. E-mail: Espinosa@química.cneuro.edu.cu

Resumen

Hoy día se concede gran importancia al conocimiento de las propiedades químico físicas, a la acción farmacológica de los diferentes componentes presentes en las aguas minerales, a los mecanismos de acción de las mismas a través de diferentes vías (oral, inhalatoria o tópica), a los métodos y procedimientos de aplicación y a las condiciones propias de los centros balneológicos, incluyendo los centros SPA. Cuba cuenta con una gran cantidad y variedad de yacimientos de aguas minerales y peloides (fangos de uso terapéutico) con propiedades farmacológicas, en virtud de las condiciones específicas de cada ecosistema físico-geográfico, los microorganismos presentes y del clima tropical del país.

La adecuada caracterización de las aguas minerales y minero medicinales requiere de un riguroso estudio de sus propiedades física químicas, porque aunque las mismas deben mantenerse estables en el tiempo, estas aguas suelen ser el resultado de complejos procesos geoquímicos donde intervienen procesos tanto químicos como bioquímicos. Este trabajo tiene como objetivo presentar la caracterización preliminar de un grupo de aguas minero medicinales existentes en nuestro país, las cuales se usan en la cura de diferentes dolencias.

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron "*in situ*" mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424 marca HANNA y oxímetro HANNA modelo HI 914. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados "*in situ*", mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. La calidad de los datos fue validada mediante el balance iónico y el cálculo de las conductividades eléctricas teóricas basado en el modelo de Miller et al. (1986), implementado en el sistema informático HIDROGEOWIN (Alvarez, et. al, 1998). El resto del procesamiento de los datos se efectuó mediante Rockware, Grapherwin, Surfer, EXCEL y ACCESS.

En este trabajo se presenta una caracterización, atendiendo a las especificaciones de la Norma Cubana de Aguas Minerales, de algunos yacimientos de aguas mineromedicinales del país a partir de datos

obtenidos en un monitoreo y estudio recientes. Mediante los gráficos y tablas adecuadas pueden determinarse las características del agua en cada yacimiento y realizarse una comparación con resultados obtenidos de los mismos en fechas anteriores, utilizando además un análisis temporal de las propiedades de dichas aguas para comprobar la estabilidad de las mismas en el tiempo con un coeficiente de variación menor de un 5%. Se analizan lugares de gran importancia e historia dentro del campo del Termalismo como San Diego de los Baños, Elguea, Ciego Montero y San José del Lago.

Abstract

Nowadays great importance is granted to the knowledge of the chemical-physical properties, the pharmacological action of the different components present in the mineral waters, the mechanisms of action of the waters, to the methods and procedures of application and to the characteristics of the balneological centers, including the SPA centers. Cuba has a great quantity and variety of locations of mineral waters and peloides (mires of therapeutic use) with pharmacological properties, related to the specific conditions of each physical-geographical ecosystem, the microorganisms and the tropical climate of the country.

The appropriate characterization of mineral and therapeutic mineral waters requires a rigorous study of its chemical physical properties, because although this waters should stay stable in time, they are usually the result of complex geochemical processes where intervene chemical and biochemical reactions. The objective of this work is to present a preliminary characterization of a group of therapeutic mineral waters in our country, which are used in the cure of different diseases.

The measurement of the geochemical parameters were carried out "in situ" by means of pH-milivolt meter, HI-8424, HANNA and HANNA HI 914 oximeter. The CO₂ and H₂S contents, and the total alkalinity (HCO₃⁻ and CO₃²⁻) were also determined "in situ", while the macrocomponents (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ and Mg²⁺) and trace components were analyzed in the laboratory before the 24 hours of having taken the samples. The quality of the data was validated by means of the ionic balance and the calculation of the theoretical electric conductivity based on the Miller et al. (1986) model, implemented in the computer system HIDROGEOWIN. The rest of the data analysis was made by means of Rockware, Grapherwin, Surfer, EXCEL and ACCESS.

In this work a characterization of some therapeutic mineral waters of the country is presented, assisting to the specifications of the Cuban Norma of Mineral Waters, with the data obtained in a recent study. By means of the graphics and adapted charts can be determined the characteristics of each water and carried out a comparison with an obtained data previously. Using temporary analysis of the properties of these waters we can check its stability in time with a variation coefficient smaller than 5%. Places of great importance and history are analyzed inside the field of Termalismo like San de los Baños, Elguea, Ciego Montero and San José de los Lagos.

Introducción

Las aguas minerales han sido utilizadas como bebida y con fines terapéuticos desde edades muy remotas, aunque durante muchos años su empleo tenía un carácter empírico y en algunos casos, estaba asociado a prácticas de hechicería. Sin embargo, con el desarrollo de la ciencia, se fueron conociendo las propiedades curativas y de beneficio a la salud en general que dichas aguas poseían, ya bien por la acción terapéutica de sus componentes químicos y biológicos en forma aislada, como por los efectos sinérgicos que poseen en su conjunto.

Hoy día se concede gran importancia al conocimiento de las propiedades químico físicas, a la acción farmacológica de los diferentes componentes presentes en las aguas minerales, a los mecanismos de acción de las mismas a través de diferentes vías (oral, inhalatoria o tópica), a los métodos y procedimientos de aplicación y a las condiciones propias de los centros balneológicos, incluyendo los centros SPA, diseñados más bien para personas sanas que aspiran a una mejor calidad de vida que para el tratamiento de enfermos.

Cuba cuenta con una gran cantidad y variedad de yacimientos de aguas minerales y peloides (fangos de uso terapéutico) con propiedades farmacológicas, en virtud de las condiciones específicas de cada ecosistema físico-geográfico, los microorganismos presentes y del clima tropical del país.

Las aguas minerales se distinguen del resto de las aguas naturales en que poseen prácticamente invariables su caudal, temperatura y composición química y bacteriológica. Cuando presentan reconocida acción terapéutica estas aguas se denominan mineromedicinales.

Agua mineral natural. Agua que se diferencia claramente del agua potable y que se caracteriza por su contenido en determinadas sales minerales y sus proporciones relativas, así como la presencia de elementos traza o de otros constituyentes útiles para el metabolismo humano, se obtiene directamente de fuentes naturales o perforadas de aguas subterráneas procedentes de estratos acuíferos. Su composición y la estabilidad de su flujo y temperatura son constantes, teniendo en cuenta los ciclos de las fluctuaciones naturales y se capta en condiciones que garantizan la pureza microbiológica original.

Agua mineral medicinal. Agua que por su composición y características propias puede ser utilizada con fines terapéuticos, desde el área de emergencia hasta el lugar de utilización, dada sus propiedades curativas demostradas por analogía de similares tipos de aguas existentes, por experiencia local, por estudios correspondientes o mediante ensayos clínicos y evolución de procesos específicos o de experiencia médica comprobada, y conservar después de ser envasada sus efectos beneficiosos para la salud humana.

Agua de manantial. Agua que emerge espontáneamente a la superficie de la tierra con un caudal determinado por el ciclo hidrológico después de ser captada mediante labores practicadas para su explotación. No posee las propiedades del agua mineral.

La adecuada caracterización de las aguas minerales y minero medicinales requieren de un riguroso estudio de sus propiedades químico físicas, porque aunque las mismas deben mantenerse estables en

el tiempo, estas aguas suelen ser el resultado de complejos procesos geoquímicos donde intervienen procesos tanto químicos como bioquímicos. Este trabajo tiene como objetivo presentar la caracterización preliminar de un grupo de aguas minero medicinales existentes en nuestro país, las cuales se usan en la cura de diferentes dolencias.

Materiales y Métodos

Las mediciones de los parámetros geoquímicos se realizaron “*in situ*” mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424 marca HANNA y oxímetro HANNA modelo HI 914. Los contenidos de CO₂ y H₂S, así como la alcalinidad total (HCO₃⁻ y CO₃²⁻) fueron también determinados “*in situ*”, mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1995) modificadas por Markowicz y Pulina (1979) y Krawcyk (1992) para muestras procedentes de terrenos cársicos. Los iones Na⁺ y K⁺ fueron determinados por fotometría de llama (fotómetro marca SOLAR 919 de la UNICAM). Para el análisis de SO₄²⁻, Na⁺ y K⁺ en muestras altamente mineralizadas se prepararon patrones idóneos y se tomaron en cuenta las recomendaciones de Capitán et al. (1987), que consideran el efecto de matriz sobre las determinaciones (Suárez, 1998).

La calidad de los datos fue validada mediante el balance iónico y el cálculo de las conductividades eléctricas teóricas basado en el modelo de Miller et al. (1986), implementado en el sistema informático HIDROGEOWIN (Alvarez et al., 1998). El resto del procesamiento de los datos se efectuó mediante Rockware, Grapherwin, Surfer, EXCEL y ACCSESS.

Resultados y Discusión

En la tabla I se muestra los resultados de los diferentes parámetros químico físicos determinados *in situ*. En la misma se puede observar las diferencias que existen entre las muestras, teniéndose aguas con muy alta salinidad como son las del Elguea (CE=61500 µS/cm), aguas con salinidad media como son las de San Diego de los Baños y Ciego Montero (CE entre 1000 y 3000 µS/cm) y aguas con salinidad muy baja como son las de San José de los Lagos (CE=615 µS/cm). También se puede ver que los potenciales redox de estas muestras son en su totalidad negativas llegando a ser muy reductores en las muestras del Elguea y San Diego de los Baños. En cuanto al pH, llama la atención la existencia de pH altos, del orden de los 8.75 para las muestras de Ciego Montero.

En la tabla II, se muestra los valores de las concentraciones de los iones mayoritarios en meq/L y los diferentes tipos de aguas que representan las muestras según Kurlov.

Tabla I. Parámetros físico químicos determinados “*in situ*”.

Localidad	Sitio	Fecha	pH	CE 25°C μS/cm	Temp °C	Eh mV	O ₂ mg/L	CO ₂ mg/L
Elguea	Champú	02/09/99	6.48	61400	35.10	35.0	0.056	1.55
Elguea	Guapo	02/09/99	6.33	61500	48.20	-303.2	0.031	1.56
Elguea	Hongos	02/09/99	6.45	61800	35.90	-266.0	0.028	2.01
Elguea	Garganta	02/09/99	6.53	62200	40.10	-284.0	0.028	1.73
Elguea	Carabaña	02/09/99	6.29	62200	41.20	-276.0	0.034	1.70
Elguea	Bombeo	02/09/99	6.61	62000	42.00	-208.0	0.072	1.05
Elguea	Belleza	02/09/99	6.51	62300	35.50	-93.0	0.047	1.42
Elguea	Piscina	02/09/99	6.58	62200	40.00	-226.6	0.088	1.30
San Diego de los Baños	El Templado	03/25/99	6.79	1460	33.40	-254.0	0.034	1.27
San Diego de los Baños	Captación	03/25/99	6.75	1522	32.60	-230.4	0.059	1.29
San Diego de los Baños	La Gallina	03/25/99	6.67	2030	36.60	-324.8	0.019	1.40
Ciego Montero	CM-1. Piscina Grande de Gimnasia	03/29/99	8.75	3710	35.80	-269.0	0.031	0.00
Ciego Montero	CM-2. Piscina de Dermatología	03/29/99	8.75	3690	31.60	-40.9	0.131	0.00
Ciego Montero	CM-4. El Chorruto	03/29/99	9.08	3640	40.00	-66.2	0.097	0.00
Ciego Montero	CM-3. Piscina Individuales	03/29/99	8.04	3700	36.20	-87.4	0.109	0.00
Ciego Montero	CM-5. Agua Carabaña	03/29/99	8.95	2870	26.60	-61.0	0.141	0.00
San José de los Lagos	El Chorruto (Las Tetras)	05/04/99	7.01	606	30.80	-205.9	0.081	0.69
San José de los Lagos	Piscina Termal (Manantial)	05/04/99	7.72	605	30.90	-119.3	0.091	0.56
San José de los Lagos	Piscina Ternal (Manantial, profundo)	05/04/99	7.24	617	31.20	-118.7	0.116	0.61
San José de los Lagos	Pozo (brocal ancho)	05/04/99	7.05	589	30.00	-180.0	0.091	0.62

Como se puede observar en la tabla II, las aguas de Elguea y Ciego Montero son del tipo clorurada sódica, las de San Diego de los Baños son del tipo sulfatadas, bicarbonatadas cálcicas, mientras que las aguas de San José de los Lagos a pesar de ser las de menor mineralización son del tipo bicarbonatadas, sulfatadas, cálcicas, sódicas magnesianas.

Tabla II. Concentración de los iones mayoritarios en meq/L y tipos de aguas según la clasificación de Kurlov.

Localidad	Sitio	Fecha	Na+K	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Tipo de Agua
Elguea	Champú	02/09/99	679.25	103.66	79.84	735.97	130.13	3.95	Na-Cl
Elguea	Guapo	02/09/99	696.55	98.23	85.33	728.46	149.91	3.75	Na-Cl
Elguea	Hongos	02/09/99	683.75	108.60	79.84	730.97	139.92	3.45	Na-Cl
Elguea	Garganta	02/09/99	683.75	108.60	79.84	730.97	139.92	3.45	Na-Cl
Elguea	Carabaña	02/09/99	703.81	108.60	79.84	740.98	149.91	3.50	Na-Cl
Elguea	Bombeo	02/09/99	673.94	108.60	79.84	730.97	129.92	3.65	Na-Cl
Elguea	Belleza	02/09/99	689.95	98.72	89.82	730.97	145.91	3.65	Na-Cl
Elguea	Piscina	02/09/99	673.64	108.60	79.84	730.97	129.92	3.35	Na-Cl
San Diego de los Baños	El Templado	03/25/99	1.25	1.97	15.97	1.10	12.99	5.15	Ca-SO ₄ -HCO ₃
San Diego de los Baños	Captación	03/25/99	1.02	1.97	14.97	1.20	11.99	4.82	Ca-SO ₄ -HCO ₃
San Diego de los Baños	La Gallina	03/25/99	3.00	3.95	23.95	1.00	25.98	4.00	Ca-SO ₄
Ciego Montero	CM-1. Piscina Grande de Gimnasia	03/29/99	31.96	0.00	3.19	30.04	4.20	0.15	Na-Cl
Ciego Montero	CM-2. Piscina de Dermatología	03/29/99	29.71	0.00	3.09	30.04	2.10	0.20	Na-Cl
Ciego Montero	CM-4. El Chorruto	03/29/99	30.36	0.39	3.09	31.03	2.00	0.25	Na-Cl
Ciego Montero	CM-3. Piscina Individuales	03/29/99	31.41	0.00	3.09	31.54	2.10	0.10	Na-Cl
Ciego Montero	CM-5. Agua Carabaña	03/29/99	30.26	0.00	3.39	31.04	2.00	0.15	Na-Cl
San José de los Lagos	El Chorruto (Las Tetas)	05/04/99	2.98	2.07	3.49	1.13	1.90	5.55	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
San José de los Lagos	Piscina Termal (Manantial)	05/04/99	3.24	1.97	3.49	1.14	0.84	5.60	Ca-Na-Mg-HCO ₃
San José de los Lagos	Piscina Ternal (Manantial, profundo)	05/04/99	3.18	1.97	3.49	1.09	2.10	5.50	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
San José de los Lagos	Pozo (Brocal ancho)	05/04/99	2.88	1.88	3.49	1.08	1.70	5.50	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄

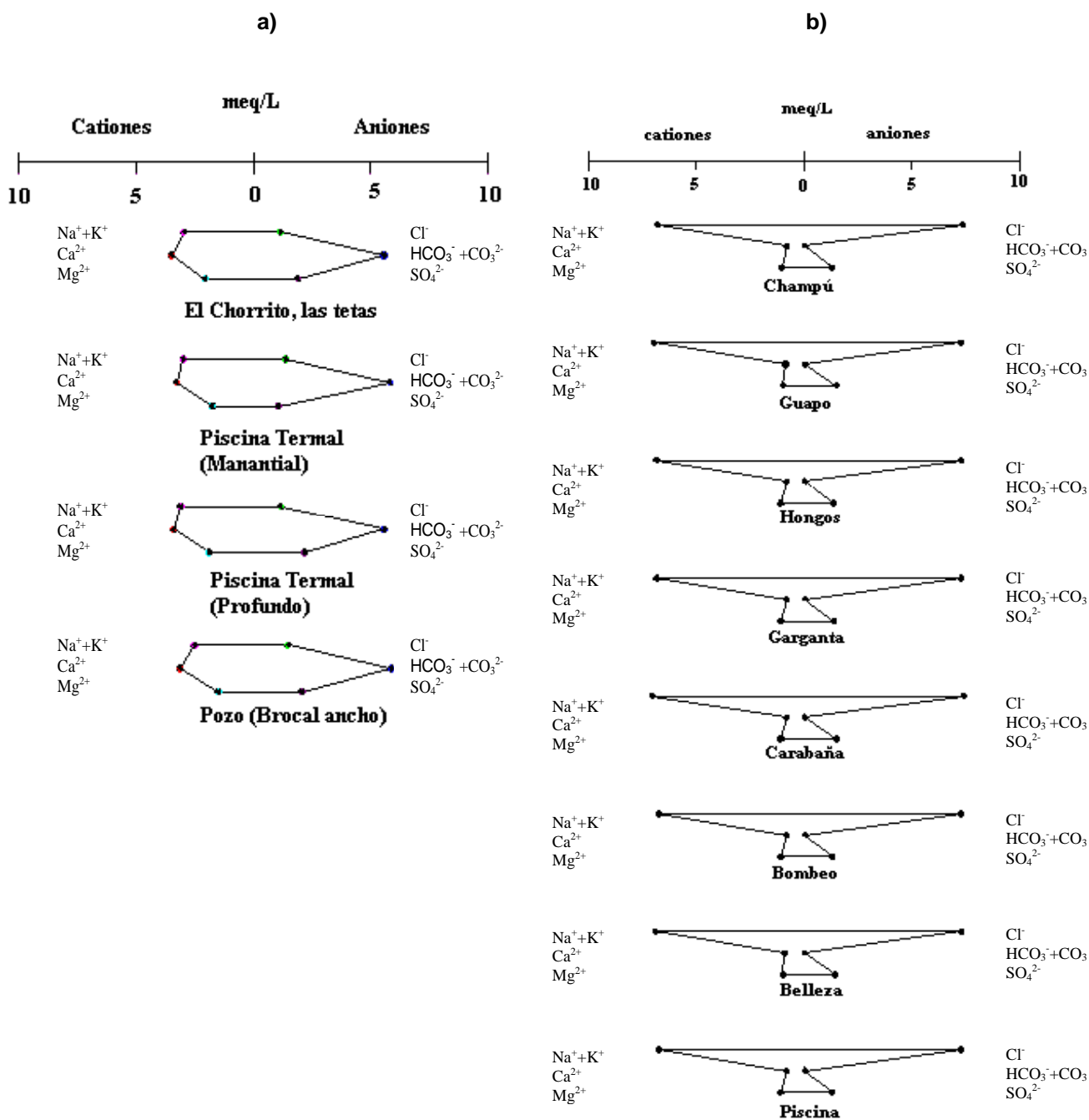
Estas características también pueden ser observadas en la figura 1, donde estos tipos de aguas son representados a través de gráficos de Stiff.

Conclusiones

Del presente trabajo se puede concluir que la diversidad de aguas minero medicinales que se pueden encontrar, en nuestro país, es grande dada a la variedad de procesos hidrogeoquímicos que modifican las características física químicas de las mismas. Por ello, la caracterización hidrogeoquímica de estas aguas depende, no sólo de la calidad de las mismas, sino también de un profundo conocimiento de las características geológicas de los terrenos por donde las mismas drenan y del estudio de la física química de los procesos químicos y bioquímicos que pueden estar influenciando en la optación de su calidad.

Bibliografía

- Alvarez E., J. R. Fagundo y I. Vinardell (1998). Automatización del control de los parámetros químico físicos y la calidad de las aguas. En: Contribución a la educación y la protección ambiental. Editorial Academia, 164-167.
- APHA, AWA, WPCF (1995). Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewater. 16th. Ed. USA.
- Capitán, L. F. (1987). Segundo Curso Técnico en Análisis de Aguas. Programa de Formación Ocupacional para Universitarios. Departamento de Química Analítica, Universidad de Granada.
- Golden Software, Inc. (1992). Grapherwin for Windows. Version 1.0, USA.
- Golden Software, Inc. (1994). Surfer for Windows. Version 5.0, USA.
- Krawczyk, W. (1992). Methods of field analytics of karst water. In: Hydrochemical methods in dynamic geomorphology. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice (1254), 65-83.
- Markowicz M. and Pulina M. (1979). Semi-quantitative chemical analyses of water in the carboniferous Karst areas. Preace Naukowe Univ. Slaskiego No. 286, Katowice, 167 pp.
- Microsoft Corporation (1997). Microsoft Access. USA.
- Microsoft Corporation (1997). Microsoft Excel. USA.
- Miller, R.L., W.L. Braford and N.E. Peters (1986). Specific conductance: theoretical considerations and application to analytical quality control. Geological Survey Water-Supply. Paper 2311, 27 pp.
- NC 93-01-218 (1995). Aguas minerales. Oficina Nacional de Normalización. (NC), 8 Págs.
- ROCKWARE Inc., ROCKWARE STIFF 2.0 (1995).
- Suárez, M. (1998). Estudio de las propiedades químico físicas y terapéuticas de algunas aguas mineromedicinales. Tesis de Diploma Universitario, Facultad de Farmacia, Universidad de La Habana, 72 pp.



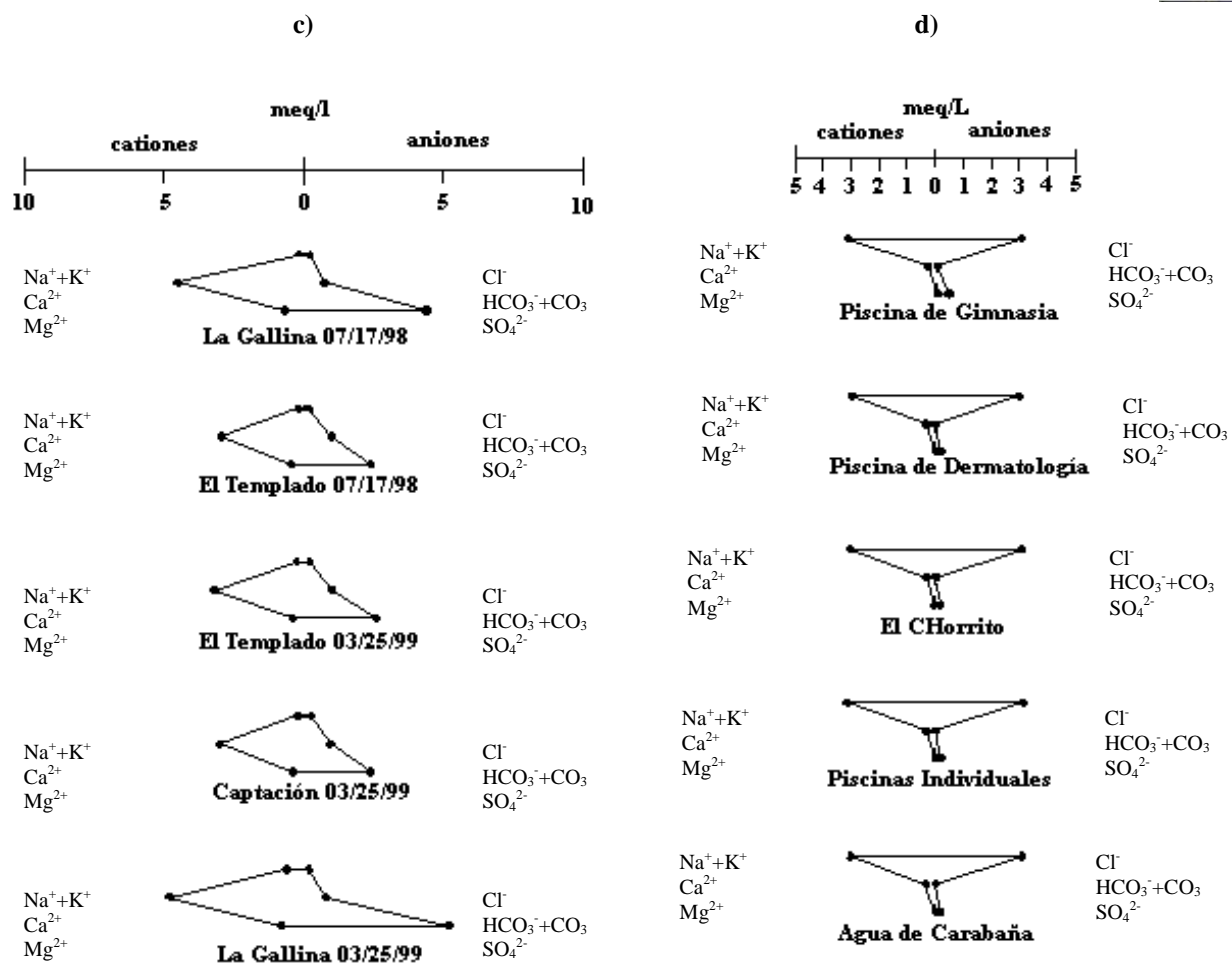


Figura 1. Representación a través de gráficos de Stiff de los diferentes tipos de aguas en:
a) San José de los Lagos; b) Elguea; c) San Diego de los Baños y d) Ciego Montero



DETERMINACIÓN DEL ANGULO DEL TALUD A PARTIR DE CRITERIOS GEOMECHANICOS

M.Sc. Rafael Falero Salgado⁽¹⁾, Ing. Antia Luna Vázquez⁽²⁾, Ing. María C. Ferrer Texidor⁽²⁾

(1) OTRM Stgo de Cuba, Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney ,
geominstgo@stg.minbas.cu

(2) Geominera de Oriente, Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney , geominstgo@stg.minbas.cu

El presente trabajo expone como a partir de solución de la tarea geológica del proyecto Oro Barita, utilizando información geológica existente, se puede resolver un asunto tan importante como es el ángulo de talud de los escalones o bancos, e introducir en los proyectos de investigación de Prospección de minerales metálicos las nuevas y novedosas técnicas utilizadas en la valoración de los macizos rocosos, utilizando principios y clasificaciones geomecánicas, las cuales tienen como parámetros fundamentales entre otros, la resistencia de la roca, el RQD, la separación entre grietas, sus condiciones, (Relleno, separación, superficie de las paredes, continuidad de las mismas, posición espacial entre ellas, y entre ellas y la excavación, etc.), flujo de agua, dureza, macrorugosidad, etc.

INTRODUCCION.

En este trabajo se utiliza para la evaluación del ángulo, la clasificación geomecánica de Beniaowski, conocida por RMR o SCIR, y con cuyos resultados y otros datos levantados en el campo, se trabaja con la clasificación geomecánica de Romana conocida como SRM, la cual está diseñada para la evaluación de taludes, también se utilizaron otros criterios geomecánicos los cuales se utilizan también con estos fines, como son los de autores como Laubscher, Orr y otros

Estas técnicas, por primera vez se utilizan en proyectos de investigación geológica de minerales metálicos en Cuba, internacionalmente son exigidos, para avalar financieramente cualquier depósito mineral y su asimilación industrial. La importancia de estos parámetros radica en que un ángulo de talud relativamente pequeño, puede hacer no rentable una explotación, aunque sea de oro por el gran comumen de destape que puede implicar.

Para la identificación geomecánica del talud, en la zona Barita además de los ensayos y determinaciones realizadas en el campo, los cuales fueron valorados de acuerdo a los criterios establecidos por cada clasificación, se utilizó la de RMR, Rock Mass Rating.

En los ensayos se determinaron las propiedades físico mecánicas de las rocas, evaluandose en el corte la zona geotécnica I, rocas intemperizadas en un alto grado y la zona geotécnica II, constituida por rocas más frescas.

En general en la zona Barita la resistencia a la compresión se agrupó en dos grupos de valores caracterizando dos zonas como se había determinado por el RQD una zona de Baja Resistencia $280 - 500 \text{ kg/cm}^2$ (Deere y Miller 1963) y otra de Muy Baja Resistencia menor de 280 kg/cm^2 , por lo que considerando los criterios de la clasificación de Deere, la calidad de la roca se evalúa Buena clase D y Regular clase E.

Teniendo estos criterios se evalúan los parámetros para el RMR (Resistencia de la matriz, RQD, Frecuencia de las grietas ó espaciamiento estado de las mismas y agua dentro del macizo).

CLASIFICACIÓN DEERE Y MILLER

Clase	Resistencia	Evaluación	Descripción	Calidad
D	Muy Baja	< 250	Zona Geotécnica I	Regular
E	Baja	250 - 500	Zona geotécnica II	Buena

Con estos valores se procedió a evaluar el resto de los indicadores para el RMR para cada una de las zonas geotécnicas.

Para la Zona Geotécnica I (Clase D)

Parámetros	Descripción	Valor
RMR	Regular	47

Para la Zona Geotécnica II (Clase E)

Parámetros	Descripción	Valor
RMR	Bueno	64

Para el cálculo del valor del ángulo de talud de la mina se utilizaron varias metodologías, preferentemente las que han dado en los últimos años los mejores resultados y que han utilizado como base de calculo los valores del RMR.

Casi todos los autores incluyendo a Beniaowski, al clasificar, evaluar ó identificar la calidad de los macizos propone valores de ángulos taludes, refiriendolos a los valores de RMR. Pero sin embargo se ha demostrado que mucho de ellos en sus recomendaciones tienen coeficientes de seguridad muy altos, Ej Beniaowski, por eso se han introducido índices empíricos para realizar correcciones y obtener valores más reales de los ángulos.

Para Laubscher (1975) para las clases II y III del RMR el recomienda valores de 55- 65 grados del talud.

El criterio de Orr (1996), propone la ecuación siguiente:

$$Bt = 35^0 \ln RMR - 71^0 \quad \text{Para Clase de RMR II hasta IV}$$

Entonces para clase (RMR II) $Bt = 60^0$ y para clase (RMR III) $Bt = 72^0$

Para el cálculo de la estabilidad se emplea la clasificación de Romana SMR, (Slope Mass Rating), la cual parte del RMR para analizar la estabilidad, calculando coeficientes de ajuste.

El uso del método de evaluación de Romana, se fundamenta, en que en la actualidad, se ha demostrado que en la mayoría de los países donde ha sido aplicada se han obtenido resultados satisfactorios y ha sido aprobada como una norma en múltiples países con tradición minera.

La clasificación SMR, introduce factores de ajuste, para los cálculos de estabilidad.

CLASIFICACION DE ROMANA SMR

No	Factor de Ajuste	Valor	Descripción
1	F1 Diferencia entre dirección de buzamiento de las grieta y el talud > 30°	0,25	Paralelismo entre el talud y cara del talud
2	F2	0,15	Rotura plana, buzamiento de las juntas inferior a 20 grados.
3	F3	-25	Normal. Buzamiento de juntas
4	F4	0	Método de excavación voladura normal, si se utiliza precorte entonces es +10

VALORES DE LOS ANGULOS DE TALUD SEGÚN AUTORES PARA LAS CONDICIONES DE BARITA

No	AUTORES	Clase	RMR	SMR	Clase	Angulo Talud
1	Beniawski	III	42			45
		II	59			55
2	Laubscher	III	42			55
		II	59			65
3	Orr	III	42			60
		II	59			72
4	Romana M.	III	42	41 (60°)	III	Parcialmente estable
		II	59	58 (70°)	II	Estable
5	Cobre	Observaciones y mediciones en campo 65° Roca de similares características Zona I				Estable
6	Falero R.	Zona Geotécnica I (RMR I)				60°
		Zona Geotécnica II (RMR II)				70°

Estabilidad SMR

Clase	Descripción	Estabilidad	Tratamiento
III	Normal	Estabilidad parcial, Rotura por algunas juntas, o algunas cuñas	Tratamiento sistemático
II	Bueno	Rotura algunos bloques,	Tratamiento ocasional

CONCLUSIONES.

Proponer para la mina un ángulo de talud de 60 y 70 grados respectivamente y para los escalones en explotación ángulos mayores, por cuanto su corta vida y por su rápido desplazamiento no tendrá efectos sustanciales en cuanto a la estabilidad. En caso en que se conozca a priori que un talud va a estar un largo periodo sin trabajarse pues se dejará con un ángulo similar al recomendado por este autor.

Durante la explotación se realizarán las correcciones pertinentes, para establecer los ángulos más óptimos para la mina en general y las ecuaciones de cálculo.

La metodología utilizada ha sido ampliamente utilizada (Collado y Gili 1988, Romana e Izquierdo, 1988, Hyun Koo 1995 sistema experto Nested, Tsimbao y Telli, 1991, Zuyu, 1995 Norma China para la clasificación de taludes y otros) y es la única que se utiliza mundialmente para recomendar valores preliminares de ángulo de talud estable. Por lo que se recomienda su uso en el yacimiento.

Requiere de la capacitación de los recursos humanos, que laboran en la parte ingeniero geológica.

BIBLIOGRAFIA

- Ayala, F.J. (1991): La Ingeniería Geológica. ITGE Madrid
Haines A, (1994): Appropriate Geomechanical Procedures Applied to Rock Engineering, IV CSMR / Integral Approach to Applied Rock Mechanic Stgo de Chile.
Hoek, E y E Brown (1985): Underground excavation in Rock. Mc Graw-Hill Book USA.
ITGE (1992): Manual de Taludes. Tipología y Desarrollo de los movimientos. ITGE, Madrid España.
ITGE (1991): Mecánica de Rocas Aplicada a la Minería Metálica. ITGE, Madrid, España.



- Romana, M. (1994): Clasificación de macizos rocosos para excavación de túneles, Ingeopress No18.
- Romana, M. (1994): Practice of SMR classification for slope appraisal. Politechnical University of Valencia, Spain.
- Romana M. (1997): El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de los taludes. IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables.
- Stagg- Zienkiewicz (1970): Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica. Editorial Blume.
- Serrano A. (1994): Resistencia y deformabilidad de las diaclasas. Curso sobre geotécnia de obras lineales CEDEX, Madrid.

PRONOSTICO DE LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO DEL MACIZO ROCOSO EN ORO BARITA

M.Sc. Rafael Falero Salgado⁽¹⁾, Inq. Antia Luna Vázquez⁽²⁾, Ing. María C. Ferrer Texidor⁽²⁾

(1) OTRM Stgo de Cuba, Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney ,
geominstgo@stg.minbas.cu

(2) Geominera de Oriente, Loma San Juan Km 2 ½ Carr. Siboney , geominstgo@stg.minbas.cu

RESUMEN

La estabilidad de una excavación va a depender de la estructura del macizo rocoso y de la relación entre los esfuerzos inducidos y la resistencia de la roca, por lo que para predecir el comportamiento de una excavación frente a dichos esfuerzos, se requiere disponer de un criterio de resistencia de la roca in situ.

Aunque la necesidad se conoce desde hace mucho tiempo, hasta hace muy poco tiempo se tomó en cuenta la consideración del factor agrietamiento, o sea la condición estructural del macizo y de la relación de las características del mismo al realizar las evaluaciones de estabilidad del macizo.

En el área de la mecánica, se ha trabajado para explicar el comportamiento del macizo rocoso sometido a diferentes condiciones de esfuerzo, existen avances en particular, en la teoría de Griffin modificada, la cual relaciona los esfuerzos principales que actúan en el fenómeno del debilitamiento y que simultaneado con el empleo de la clasificación geomecánica RMR permite obtener valores de resistencia suficientemente próximos a los reales del macizo.

INTRODUCCION.

Considerando los trabajos actuales y futuros que se desarrollan en la zona del Cobre, es de una gran utilidad evaluar el pronóstico de resistencia del macizo rocoso, lo cual redundaría en economía en el análisis de los costos en fortificación, pilares, aberturas de excavaciones, así como en los indicadores tan sensibles como el consumo de explosivos.

El objetivo del tema está relacionado con la actualidad, novedad y vigencia de la tecnología de evaluación de los macizos rocosos, y se justifica económicamente por disminuir los costos mineros hasta un 15 -18 % del total de costos, por conceptos de derrumbes, caídas de bloques de mineral y estéril, sobreexcavación, fortificación, dimensiones de pilares, pérdidas de bloques de mineral y otros fenómenos propios de la actividad.

Por primera vez se utiliza en Cuba esta metodología de pronóstico en un proyecto geológico de evaluación de un yacimiento mineral metálico o no metálico.

PRONOSTICO DE LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO EN ORO BARITA

Antes de la ejecución de los trabajos mineros en el macizo rocoso, el mismo se encuentra en un estado tensional - triaxial de equilibrio, producido fundamentalmente por la acción del peso de las rocas que yacen sobre el.

Al realizarse las labores mineras, el equilibrio del macizo se destruye y en él tiene lugar, una redistribución de tensiones, la cual tiene un carácter complejo. En las rocas que rodean las excavaciones, surgen concentraciones de tensiones, lo que en determinados casos puede conducir a la destrucción de las excavaciones, es, en estos casos, cuando se considera necesario emplear medios de luchas contra las deformaciones y contra el desplazamiento de las rocas en el sentido de la excavación.

El estado tensional del macizo antes de ser laboreado a una profundidad dada se encuentra en un estado elástico que obedece a la ley de Hooke para rocas ligadas, y considerando el medio homogéneo e isotrópico se estableció que las tensiones principales se expresan de la forma siguiente:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \{ \mu / 1 - \mu \}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ _____ esfuerzos principales
 μ _____ modulo de poisson

Esta expresión es valida para profundidades no muy grandes, pues las rocas pasan de un estado elástico al plástico con el aumento de la profundidad. ($\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_z$) donde los ejes X, Y, Z coinciden con las de las tensiones principales en el macizo.

En los ensayos en rocas se ha comprobado, que las mismas no se comportan de forma elástica, por lo que se han propuestos varios modelos para la evaluación del estado límite tensional de la roca, así como teorías de resistencia para evaluar el estado tensional de la roca.

Aunque el hombre desde tiempos remotos ha realizado trabajos de extracción o de construcción en rocas, hasta muy poco tiempo atrás tomó en consideración el factor agrietamiento o sea la condición estructural del macizo rocoso y de la relación de las características del mismo al realizar las evaluaciones de estabilidad del macizo rocoso.

La estabilidad de una excavación va a depender por tanto de la estructura del macizo y de la relación entre los esfuerzos inducidos y de la resistencia de la roca. Por lo que para predecir el comportamiento de una excavación frente a dichos esfuerzos, es necesario disponer de un criterio de resistencia de las rocas in situ.

Esta necesidad se conoce durante mucho tiempo y gran parte de las investigaciones en mecánica de rocas se ha dedicado a la búsqueda de formas más completas y exactas de criterios que representen dicha resistencia. Las dificultades en la obtención de estos criterios (teorías) ha motivado que por razones practicas y económicas normalmente la resistencia de la roca se determina para muestras de pequeñas dimensiones, lo cual, lógicamente no representa la resistencia real del macizo. Ha medida que se aumenta el tamaño de las muestras o el factor de escala, la resistencia tiende hacia un valor más real.

Resulta muy fácil realizar ensayos con muestras pequeñas y obtener de ellas la información. Sin embargo, realizar ensayos sobre muestras grandes e intensamente fracturadas es muy difícil, y de alto costo por el tamaño de la operación. Por ello es necesario utilizar algunos criterios para extrapolar los resultados de laboratorio a las condiciones reales del macizo rocoso, como sería el criterio empírico de Hoek y Brown.

Como se conoce muchos investigadores (E.T. Brown, N.G.W.Cook, C.Fairhurt, R.E.Goodman, E. Hoek, N.R.Morgenstern, B. H. Brady, y muchos otros) han realizado diferentes trabajos, en el área de la mecánica de rocas, con el objetivo de explicar el comportamiento del macizo rocoso sometido a diferentes condiciones de esfuerzos, pero hasta el momento no existe un criterio o teoría exacta única que explique todos los factores que intervienen en dichos comportamiento.

En el desarrollo de estas investigaciones sin embargo existen avances, en particular, por ejemplo, la teoría de Griffin modificada proporciona las bases del criterio empírico de Hoek y Brown, el cual relaciona los esfuerzos principales que actúan en el fenómeno de debilitamiento de la roca. Este criterio basado en la experiencia teorica practica desarrollada responde a la siguiente relación

$$\sigma_1 / \sigma_c = \sigma_3 / \sigma_c + \sqrt{\{m (\sigma_3 / \sigma_c) + S\}} \quad \# 1$$

Donde:

σ_1 esfuerzo principal mayor (esfuerzo de falla)

σ_3 esfuerzo principal menor

σ_c resistencia a la compresión de la roca intacta.(antes de ser sometida a los esfuerzos σ_1 y σ_3 en obtenidos ensayos traxiales).

m constantes que dependen de las propiedades de las rocas.

S constantes que dependen del grado de fracturación de las rocas. (antes de ser sometidos a los esfuerzos σ_1 y σ_3).

Para valores de $\sigma_3 = 0$, entonces la resistencia a la compresión uniaxial será:

$$\sigma_{cs} = \sqrt{(S \sigma_c^2)} \quad \# 2$$

si la roca es intacta: $S = 1$ y $\sigma_{cs} = \sigma_c$.

si la roca está fracturada $S < 1$ será $\sigma_{cs} < \sigma_c$.

La resistencia a la tracción uniaxial se obtiene de sustituir:

$\sigma_1 = 0$ en la ecuación # 1 y resolviendo la ecuación cuadrática para σ_3 , obteniendose la ecuación:

$$\sigma_t = 1/2 \sigma_c \{ m - \sqrt{\{m^2 + 4 S\}} \} \quad \# 3$$

Los parámetros " m " y " S " se determinan en ensayos traxiales y aplicando un análisis de regresión lineal de la formula # 1 y σ_c se estima en ensayo de carga puntual, compresión simple o analíticamente.

También se ha establecido que la mayoría de las rocas se comportan como un material quebradizo, es decir, a medida que disminuye su capacidad de resistir carga aumenta su deformación, la ecuación # 1 es valida para:

$$\sigma_1 = 3,4 \sigma_3$$

Este valor indica la transición entre el comportamiento quebradizo a dúctil de la rocas. Fig. 3 y 4
Se considera como límite de aplicación de la ecuación # 1 la condición de que:

$$\sigma_1 = 2 \sigma_3$$

Tomando como antecedentes lo expuesto anteriormente consideramos que una de las vías para evaluar de forma pronostica la resistencia del macizo es la de utilizar la presente formulación, fundamentalmente por resultar fácil, de resultados aceptables y de muy fácil aplicación.

Considerando los trabajos que actualmente se desarrollan en el yacimiento Barita de gran utilidad evaluar el pronostico de resistencia.

Al ejecutarse la evaluación de terrenos, utilizando algunas de las clasificaciones existentes, entre las cuales se encuentran más difundidas las de CSIR o NGT, a partir de los valores obtenidos para el terreno se determinan los valores de " m " y " S ".

En el terreno se ejecutan los trabajos de campo que permitirán el levantamiento de las características geológicas del macizo rocoso en cuestión, tipo de roca, estado, dureza, grado de agrietamiento, RQD, espaciamiento promedio de las grietas, resistencia a la compresión, y otros factores más y a partir del "rating" obtenido se pronostican los valores de cohesión (C), y el ángulo de fricción.

La relación # 1' la podemos expresar de la siguiente forma y tendremos:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m G_c \sigma_3 + S \sigma_c^2)} \quad \# 6$$

Esta expresión se reescribe después de transformaciones de la siguiente forma:

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{(m \sigma_{3n} + S)} \quad \# 7$$

σ_{1n} y σ_{3n} --- valores de los esfuerzos normales

Entonces, con los valores y ajustes que se realicen a partir de los resultados de la elaboración de los datos obtenidos en el campo estamos en condiciones de pronosticar la resistencia del macizo rocoso. A partir de la ecuación #7 y para los diferentes valores de las constantes del material(S y m) para el tipo de roca que se evalúa, se establece la ecuación de comportamiento para la roca intacta y para el comportamiento in-situ de la roca estudiada, obteniéndose dos ecuaciones de acuerdo a las tablas con los valores S y m/m₁, donde m₁--valor de (m) para la roca intacta, y m--valor de (m) para el macizo rocoso contra los sistemas de evaluación de terrenos.

El empleo de los gráficos obtenidos servirá como guía para el cálculo de los diseños mineros y de construcciones varias.

Se sugiere la aplicación de esta metodología por su simplicidad, economía, por su bajo costo de empleo, y la confiabilidad de sus resultados para la evaluación del pronóstico de la resistencia del macizo rocoso.

Modo de aplicación, ejemplo práctico según la clasificación geomecánica de Bieniawski (CSIR).

Del estudio de un macizo tobaceo en el que hay que perforar un túnel se determinaron los siguientes resultados:

Datos generales---Tobas frescas, dura.

Frecuencia de 4 fracturas por metro

Parámetros de clasificación	Valor	Puntuación
1-Resistencia del material inalterado.	150 Mpa	12
2-RQD	70%	13
3-Espaciamiento de las grietas	0.5 M	20
4-Estado de las grietas	Superf. levemente rugosas. Separación < 1 mm. Paredes de roca dura.	20
5-Agua subterránea	Agua de presión moderada	4
PUNTUACION SUBTOTAL-----		69
6-Ajuste por la orientación de la excavación	Excavación perpendicular al rumbo del sistema principal de grietas, con un buzamiento de 30 grados contra la dirección del avance	(-10)
PUNTUACION TOTAL-----		59

De acuerdo a la clasificación, la roca se evalúa en la parte alta de la zona III "(ROCA REGULAR)

Ajustando la ecuación # 7 para $S = 1$; $m = 25.0$; $\sigma_c = 150 - 200$; ángulo de fricción interna 35 -40 grados.

El comportamiento de la roca intacta viene dado por:

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{25 \sigma_{3n} + 1}$$

De la clasificación también se obtiene, para la roca estudiada los valores de $S = 0.004$ y $m = 2.5$

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{2.5 \sigma_{3n} + 0.004}$$

Los resultados de las ecuaciones se grafican como en la figura # 5.

Para todo el área de estudio las ecuaciones utilizadas, se detallan más abajo, para las zonas geotécnicas I y II

CRITERIO DE HOEK Y BROWN

Ecuación general	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (m \sigma_{3n} + s)^{1/2}$
Coeficientes: m, f (material)	s, f (agrietamiento)

Zona geotécnica I

Para la roca intacta

Para el macizo rocoso correspondiente

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (10 \sigma_{3n} + 1,0)^{1/2}$$

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (0,20 \sigma_{3n} + 0,0001)^{1/2}$$

Zona geotécnica II

Para la roca intacta

Para el macizo rocoso correspondiente

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (17 \sigma_{3n} + 1,0)^{1/2}$$

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (0,30 \sigma_{3n} + 0,0001)^{1/2}$$

Tabla 1

Indicadores	UM	Zona geotécnica I				Zona geotécnica II			
Esfuerzos Principales normales		ROCA INTACTA		MACIZO ROCOSO		ROCA INTACTA		MACIZO ROCOSO	
		σ_{1n}	σ_{3n}	σ_{1n}	σ_{3n}	σ_{1n}	σ_{3n}	σ_{1n}	σ_{3n}
		3.8	0.8	1.2	0.8	4.62	0.8	1.32	0.8
		3.5	0.7	1.07	0.7	4.29	0.7	1.18	0.7
		2.9	0.5	0.81	0.5	3.58	0.5	0.91	0.5
		2.3	0.3	0.54	0.3	2.76	0.3	0.62	0.3
		2.0	0.2	0.40	0.2	2.29	0.2	0.46	0.2
		1	0	0.03	0	1.0	0	0.01	0
		0.0	-0.15	0.0	-0.01	0.0	-0.01	0	-0.0005
σ_c	Mp	8				37.5			

CONCLUSIONES.

En los informes de proyectos, hasta la fecha actual Dic. 2000 se entregan solamente los valores de la resistencia de las muestras ensayadas y en este trabajo se presentan los valores notables del pasaporte de resistencia de la roca intacta (muestras ensayadas) y los valores notables del pasaporte del macizo rocoso, este último permite no realizar sobreestimaciones en la proyección de los costos, a nivel internacional estos costos sobrepasan el 10% del valor de las obras.

Aún hay valores de ensayos, que no se han recibido, por lo que los resultados son preliminares.

BIBLIOGRAFIA

1. Blanco R. " (1981): Mecánica de Rocas Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. Editorial Oriente
2. Castro O. G. (1989) : Mecánica Rocas Aplicada a las Construcciones. Editorial Oriente.
3. Oliva V. (1984): Propiedades Mecánica de Suelos. Editorial Oriente
4. Menéndez José (1973) : Mecánica de Suelos, Dpto. Geotécnia Escuela Ingeniería Civil CUJAE.
5. Otaño Noguel J. (1981) Elementos de Física de las Rocas ". Editorial Pueblo y Literatura.
6. Hoek E. y Brown E. (1980): Excavaciones Subterráneas en Rocas. Mc. Graw-Hill de Mexico.
7. Barton N.; Lien R.; Lunde J. (1974) : Engeneering Classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Springer Verlag Vol pp 189-236)
8. Buniawski Z. T. (1979): The geometric Classification in rock engeneeing aplicaciones 4^{to} Congreso Internacional de Mecánica de Rocas, Montrux Tomo 2 pp 41 - 48
9. Deere D. V (1968). " Technical description of rock cores for engeneering purposes. Mecánica de Rocas. Editorial BLUME.



LA EROSIÓN SUBTERRÁNEA EN SUELOS CARBONATADOS DE LA REGIÓN CENTRAL DE CUBA. CASO DE ESTUDIO "PRESA ZAZA".

M.Sc. Ing. Fermín E. Sarduy Quintanilla⁽¹⁾, Ing. Tomás Díaz Pérez⁽¹⁾, Ing. José L. Peñate Fleites⁽¹⁾, Ing. Neldo P. San Román Pérez⁽¹⁾, M.Sc. Domingo E. Delgado Martínez⁽²⁾.

(1) Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara. Ave. Libertadores # 201 e/ Jesús Menéndez y Danielito. Santa Clara 4. Cuba, CP 50400. Correo electrónico: eiphvc@ip.etecsa.cu.

(2) Universidad Central de Las Villas. Facultad de Construcciones. Carretera de Camajuaní km 5½. Santa Clara. Correo electrónico: domingo@uclv.etecsa.cu

RESUMEN

En la región central de Cuba abundan los suelos carbonatados. En más del 70 % del territorio se desarrollan formaciones geológicas donde predominan este tipo de suelos que, por su naturaleza son potencialmente erodables, fundamentalmente cuando están bajo la influencia de las oscilaciones del niveles de las aguas subterráneas o en contacto con ella en embalses u otro tipo de obra hidrotécnica.

La presa Zaza (caso de estudio) está construida sobre la Fm. Paso Real, representada por rocas y suelos carbonatados. Desde su construcción en 1973 han ocurrido filtraciones que con el tiempo fueron aumentando hasta que, en la década del 80, se registraron alrededor de 80 l/s. En 1999, después de un período de intensas lluvias se registraron filtraciones superiores a los 130 l/s, lo cual llevó a realizar una investigación que logró la caracterización geotécnica de los materiales de la cortina y de los suelos de la base, especialmente de la capa a través de la cual se producen las filtraciones, así como la composición química de estos suelos y de las aguas del embalse.

Con estos resultados fue posible elaborar una hipótesis sobre la génesis y desarrollo de las filtraciones, las cuales se relacionaron con el fenómeno de sifonamiento (**tubificación**), que inicialmente tuvo un origen químico y, con el paso de los años, se desarrolló también el mecánico. Lo que demuestra que estos fenómenos no sólo se presentan en suelos de naturaleza dispersiva, siendo posible también en suelos carbonatados.

ABSTRACT

At about of 70% of the soils and rocks (or geological series) presented all around the Cuban territory are formed by carbonated sediments, which are highly erosive, mainly when they are influenced by the oscillations of the groundwater table in an specific area or when they are in closely contact with the water mass from reservoirs or else.

The Zaza Dam (case of study) is built on the Fm. Paso Real, represented by rocks and carbonated soils. From their construction in 1973 some filtrations and leakages have occurred in it. With time (in the 80's), there were registered filtrations that surpassed 80 l/s. In 1999, after a period of intense rains, very significant filtrations were registered at about 130 l/s. This situation superimposed an urgent program of investigations based mainly in geotechnical and geochemical characterization of the sediments present at wall and basement of the dam, specially those in the covering through which the filtrations are produced.

As the main outcomes from these research project an hypothesis on the genesis and development of filtrations of the chemical origin at the beginning and later caused by the mechanical processes is developed and corroborated.



INTRODUCCIÓN

Según el Mapa Geológico de Cuba Central (provincias de Villa Clara, Cienfuegos y Sancti Spíritus) a escala 1:100 000 (D. García Delgado, R. Delgado Damas, G. Millán Trujillo y otros, 1998), predominan en esta región las formaciones carbonatadas, sobre todo las que forman parte de la cobertura postorogénica que se extiende sobre el resto de las unidades más antiguas transgresivamente, y su edad va desde el Eoceno Medio parte alta – Oligoceno. La Fm. Paso Real, que forma parte de esta unidad es la de mayor desarrollo y, por su constitución litológica son frecuentes los fenómenos de erosión subterránea; esto se demuestra en el caso de estudio (presa Zaza).

La presa está situada a 10 km al sureste de la ciudad de Sancti Spíritus. Tiene una capacidad de embalse de $1020 \times 10^6 \text{ m}^3$, con una cuenca hidrográfica que alcanza un área de $2\,146 \text{ Km}^2$, a la cual drenan los ríos Zaza, Tuinicú, Yayabo y Taguasco y entrega garantizada de 10^6 m^3 . La mayor parte de estas aguas se utilizan para el riego de las áreas arroceras del CAI "Sur del Jíbaro", el resto se deriva para zonas con caña y cultivos varios al sur de Ciego de Avila.

Los materiales con que se construyó la cortina son de origen aluvial y se explotaron en las márgenes del río Zaza (las características de las mismas se exponen en este trabajo). La sección de la cortina es de tipo homogénea y para su colocación se realizó un dentellón constructivo con profundidad máxima de 1.5 m. En la zona del río se construyó un delantal para evitar las filtraciones.

La litología que conforma la base natural de la presa está representada por materiales carbonatados que se describen como Fm. Paso Real y se desarrolla en toda la zona que ocupa el embalse. En esta Formación son característicos los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas, margas y arcillas. Las calizas son arcillosas, biotriticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margoso-arenácea y, en general, son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas.

Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita). La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos, y grisáceo y verdoso en los terrígenos. De edad Oligoceno Superior - Mioceno Medio parte alta.

En las terrazas de los ríos, sobreyaciendo a las litologías descritas anteriormente, se desarrollan depósitos aluviales recientes (**al Q₄**), conformados por limos grises y gris pardusco, limos arenosos y arcillas arenosas.

Esta investigación ingeniero-geológica se realizó entre los meses de octubre de 1999 a mayo del presente año y tuvo como objetivo fundamental presentar a la parte proyectista la información necesaria para el proyecto de las soluciones definitivas de las filtraciones que se producían en un sector de la margen izquierda. No obstante con los resultados obtenidos fue posible inferir las causas que originaron el aumento de dichas filtraciones, frecuentes también en otras obras que se han estudiado en esta Formación o en otras con litologías semejantes donde predominan los suelos carbonatados.



LA EROSIÓN SUBTERRÁNEA DE LOS SUELOS

No pretendemos abordar esta temática desde el punto de vista conceptual, nuestro propósito es analizar este fenómeno según el criterio de diferentes autores; con lo cual enfocamos los elementos comunes a los suelos que más abundan en Cuba (los carbonatados) y, en especial, los que están presente en la presa Zaza.

Los términos **sifonamiento** y **tubificación** son tratados como sinónimos por George B. Sowers y George F. Sowers (1979) y lo describen como el proceso de abertura o conducto en el suelo como consecuencia del arrastre que se produce, dentro de la zona de agitación que al inicio forma un hoyo o fosa. Posteriormente se produce una concentración de agua en el hoyo y aumenta el gradiente hidráulico porque se acorta el camino del flujo; como consecuencia la agitación se hace más violenta y el hoyo mas profundo, abriéndose camino en dirección aguas arriba a una velocidad creciente hacia el lugar de donde viene el agua. Este fenómeno es frecuente que comience por agitaciones muy localizadas o concentraciones de flujo, según estos autores, en los suelos no cohesivos confinados, los gradientes se mantienen generalmente, por seguridad, por debajo de 3 o 4. En arcillas los gradientes destructivos pueden exceder de 50, pero rara vez son críticos en los proyectos.

En cambio, J.A. Jiménez Salas y J.L. De Justo Alpañes (1975) describen estos fenómenos diferenciadamente. El fenómeno de **sifonamiento** se manifiesta como verdadera licuefacción de una masa de terreno y en ella el agua tiene un gradiente vertical adecuado para anular las presiones efectivas. Estos autores examinaron el fenómeno de manera semejante a los autores anteriores, pero establecieron que la condición para que se produzca el **sifonamiento** es:

$$i_c = (\gamma_{\text{saturado}} / \gamma_w) - 1$$

Es más frecuente otro fenómeno que, al menos en su iniciación, es de menor escala y también se le suele llamar **sifonamiento**. Sin entrar en la discusión de que es lo más apropiado, llaman a este fenómeno **tubificación**, para distinguirlo del primero. La **tubificación** consiste en la apertura, por erosión regresiva de uno o varios conductos a través del suelo. Estos conductos, si las circunstancias no varían, irán aumentando de sección y pueden conducir a la ruina de la obra.

Ambos fenómenos están relacionados y es frecuente, por ejemplo, que, en condiciones próximas al **sifonamiento**, este no llegue porque antes se produce una **tubificación** brutal que vacía totalmente la reserva de agua, anulando el gradiente. Esto suele ocurrir debido a que se produce la condición de **sifonamiento** en puntos determinados provocado por las condiciones geométricas que concentran las líneas de corriente en algunos puntos, o bien por heterogeneidades del terreno. Estos sifonamientos localizados inician la erosión regresiva y la **tubificación**.

La condición de **sifonamiento** que se establece, según lo expresado anteriormente, es independiente del coeficiente de permeabilidad del terreno y de su naturaleza, pero observamos que el fenómeno puro apenas se presenta más que en arenas finas, de donde viene el concepto de arenas movedizas.

Según Taylor (1961) esto se debe a que el caudal que precisan es menor que en suelos más gruesos, pero lo cierto es que, en condiciones particulares, creadas por el hombre (agotamiento de excavaciones,



construcciones de presas, etc.) se llega muchas veces a las proximidades del **sifonamiento**, y lo que suele presentarse (excepto en las arenas finas) es la **tubificación**.

En determinados suelos arcillosos, los tubos formados tienen gran estabilidad, y es posible que el proceso se estabilice, sin más, durante meses o años. Pero en otras arcillas y en prácticamente todos los suelos de transición (suelos areno-arcillosos, limosos, arcillo- limosos, etc.) la erosión los ensancha con gran rapidez, conduciendo a la catástrofe. El índice de dispersión es importante para prever el comportamiento del suelo en esta eventualidad; sin embargo Sherard ha puesto a punto otro ensayo más directo, que consiste en observar el comportamiento de una muestra de suelo, en la que existe un conducto de 1 mm de diámetro, producido por medio de un pinchazo con una aguja de esas dimensiones, y por lo cual se hace circular agua (ensayo de "Pinhole").

Otros factores relacionados con los procesos de erosión subterránea de los suelos.

Existen en la naturaleza algunos suelos de granos finos que son muy sensibles a la erosión y tienen más alto contenido de sodio disuelto en el agua de los poros que los suelos ordinarios. La gran diferencia en el comportamiento de ambos suelos es que los primeros se erosionan por un proceso en el cual las partículas arcillosas coloidales se van en suspensión, aún en aguas tranquilas, (no existe umbral de velocidad) por debajo del cual el flujo de agua no causa erosión. La existencia de este tipo de suelos (arcillas dispersivas) se asocia a los procesos de erosión y fallas por sifonamiento en presas de tierra.

Las sales pueden encontrarse en los suelos y las rocas en estado sólido, disperso, en forma de concreciones, intercalaciones o disueltas en el agua de los poros. A este último caso debemos prestar atención, ya que el contenido relativo de sodio en el agua de los poros o intersticial es uno de los factores principales que gobierna la dispersión.

El alto contenido de sodio provoca que en la disposición estructural de estos suelos predominen las fuerzas de repulsión entre partículas, llevando un arreglo de estas de forma paralela que se denomina estructura orientada o dispersa. La influencia de las sales disueltas sobre las propiedades del suelo se asocia a la composición catiónica (Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) y por ese orden el grado de dispersión decrece, con el aumento de las sales en el agua de los poros generalmente se produce la neutralización de las propiedades arcillosas de los suelos.

En Cuba hay evidencias sobre la existencia de suelos dispersivos. En febrero de 1980, se reporta por primera vez un estudio sobre este tipo de suelos. Después en 1986, en la provincia de Camagüey se inicia una nueva etapa sobre el estudio de los suelos dispersivos, que continúa hoy día y en cuyos resultados se reporta la presencia de este tipo de suelos.

Independientemente de su naturaleza dispersiva, los suelos carbonatados son potencialmente propensos a que se presenten en ellos los fenómenos de erosión subterránea, fundamentalmente del tipo "**Tubificación**", el cual se manifiesta a causa de la heterogeneidad en su composición granulométrica.

INVESTIGACIONES REALIZADAS

Para dar respuesta a la tarea presentada se realizaron varios trabajos de campo y gabinete que, tuvieron una duración de 8 meses. Estos se detallan a continuación:



Estudios Geofísicos.

Los trabajos geofísicos se realizaron con el objetivo de ubicar las perforaciones en los lugares adecuados y de complementar los resultados de las mismas. Se aplicó un complejo de métodos geoeléctricos, a través de perfiles paralelos a la cortina y sobre esta, desde la toma de agua hasta el hombro izquierdo, los mismos se realizaron en el orden siguiente:

- Sondeo Eléctrico Vertical (SEV): Permitió definir los diferentes horizontes geoeléctricos asociados a las litologías presentes, fundamentalmente sus potencias. Este método se realizó en su modalidad Slumberger y por lo general se ejecutaron en puntos cada 50 m con un AB máximo de 620 m.
- Perfilaje eléctrico Simétrico (PES), doble abertura: Con este método se determinaron las discordancias verticales existentes entre las capas y permitió el mapeo de la zona con suelos de mayor permeabilidad.
- Campo Eléctrico Natural (CEN): Se aplicó en la zona en que se presentan los suelos de mayor permeabilidad, con lo cual se delimitó el horizonte donde se producen las mayores filtraciones

Perforación de calas y otros.

Se realizaron varias perforaciones (hasta una profundidad de 15 m por debajo de la cortina) por el método rotario y a percusión con penetración dinámica, en las cuales se ejecutaron pruebas de filtración (inyección de agua a diferentes escalones de presión, con régimen no estabilizado); se muestrearon los materiales colocados en la cortina y los suelos de la base (bolsas, shellys y monolitos) para su caracterización geotécnica.

Para la caracterización de las aguas, tanto del embalse como de los puntos de filtración se analizaron los registros históricos de los muestreos sistemáticos que ha realizado la DPRH de S. Spiritus. Con ello fue posible inferir el efecto que produce el paso del agua del embalse por los sectores de filtración.

Los ensayos de laboratorio que se realizaron para la caracterización de los suelos fueron:

Granulometría, Hidrómetro, Límite de Atterberg, Humedad Natural, Densidad Natural, Peso Específico, Próctor Estándar, Cortante Rápido Natural, Cortante Lento Natural, Consolidación Natural, Sales Solubles y Carbonatos.

RESULTADOS

A partir de los resultados del complejo de métodos geofísicos y las perforaciones realizadas se definió el corte geotécnico que se presenta entre la toma de agua y el hombro izquierdo de la presa (figura 1).

Estas capas se describen de la siguiente forma:

Material de la Cortina: La potencia máxima en el sector estudiado es de 14.8 m . Presenta ligeras variaciones en su contenido de arena fina y arcilla, con algunas intercalaciones de material rocoso, sobre todo en superficie. Clasifica como una arcilla arenosa de media plasticidad, con pocas gravas, sin actividad coloidal, muy hidrófila, de consistencia firme, muy húmeda y con agresividad al hormigón positiva. En el gráfico de dispersión se ubica, mayoritariamente, en la zona de duda. Clasifica por el SUCS como CL. En general su estado de conservación es bueno y es prácticamente impermeable.



Capa 1: Yace siempre por debajo de la cortina y encima de las capas 2 y 3. Se cortó con una potencia promedio de 1.16 m. Su origen es eluvial deluvial, con una distribución bastante generalizada en el área. Se describe como una arcilla arenosa de baja plasticidad con algunas gravas y alto contenido de limos, no dispersiva, con positiva agresividad al hormigón. Aunque no se le realizaron de permeabilidad, no debe presentar valores altos de su permeabilidad. Clasifica por el SUCS como CL.

Capa 2: Subyace a la capa 1, excepto en un sector de aproximadamente de 70.0 m, donde yace directamente debajo de la cortina (aflora en la zona del embalse); su potencia máxima es de 3.60 m. Esta capa es muy permeable, con valores de permeabilidad superiores a los 5 m/día; por lo cual las filtraciones que tienen lugar en la presa se producen a través ella. Se describe como una grava arcillosa con contenido variable de finos que poseen baja plasticidad (figura 2). No presenta una tendencia dispersiva, ya que en el gráfico de contenido de Sodio contra el Total de Sales Solubles se ubica en la zona no dispersiva (figura 3). En general se halla suelta, saturada, con presencia de gravas y fragmentos de caliza muy alterados y carsificados. Con bastante regularidad presenta lodo en su interior como resultado del paso de las aguas que se filtran. Clasifica por el SUCS como GC.

Capa 3: Se presenta por debajo de las capas 1 y 2, aunque en algunos lugares yace directamente por debajo de la cortina. Es la capa más generalizada en el corte; presenta intercalaciones de materiales más gruesos y finos, los cuales se definen como capas 3a, 3b y 4; imposibles de correlacionar. Es un eluvio de marga, se describe como una arcilla arenosa con algún contenido de gravas, de baja plasticidad de la fracción fina, de consistencia firme, muy húmeda y no dispersiva. Clasifica según el SUCS como CL y de acuerdo a su permeabilidad es impermeable a poco permeable, ya que los valores obtenidos en las pruebas hidrogeológicas fluctúan entre 0.0001 y 0.037 m/día.

Capa 3a: Está asociada a la capa 3, se distribuye en intercalaciones de forma caótica, tanto vertical como horizontalmente, imposible de correlacionar en el corte. Su potencia es pequeña. Está constituida por una arcilla de alta plasticidad prácticamente sin gravas, de consistencia firme y no dispersiva. Clasifica según el SUCS como CH y por su permeabilidad es poco permeable.

Capa 3b: Aparece también asociada a la capa 3, constituye su facie más gruesa, yace a manera de intercalación, sin continuidad en el corte. En general, tiene menor desarrollo que las dos capas anteriores. Está constituida por una grava arcillo limosa, con baja plasticidad de su facie fina al igual que la capa 2, de la que difiere porque yace a mayor profundidad y tiene un menor grado de alteración. Es de baja permeabilidad, con valores de 0.02 a 0.001 m/día. Clasifica de acuerdo al SUCS como GC.

Capa 4: Sus características son similares a la capa 3b, con diferencia en su granulometría (más gruesa) y se comporta como una semirroca. Es una caliza más o menos margosa, con alto grado de conservación, aunque presenta gran cantidad de fósiles y algunas oquedades cársicas, que son más abundantes en las zonas más carbonatadas. La matriz está constituida por sedimentos finos. No se le realizaron pruebas hidrogeológicas pero, teniendo en cuenta su aspecto físico, se pueden estimar valores medios y altos de permeabilidad, aunque asociados a zonas muy locales, debido a su falta de continuidad en el corte.



Análisis hidrogeoquímico.

La composición química de las aguas del embalse es muy semejante a las que se muestrearon en las zonas de filtración, sólo presentan diferencias significativas en los contenidos de HCO_3 y Ca (figura 4).

Independientemente del alto contenido de carbonato de calcio que presentan estos suelos, es evidente que el enriquecimiento de las aguas en la zona de las filtraciones muestra un alto índice de disolución provocado por la agresividad de las aguas del embalse al carbonato de calcio y por la alta permeabilidad de la Capa 2 que permite un mayor contacto del agua con las zonas carbonatadas, a pesar de la corta trayectoria desde el embalse hasta unos 80.0 m aguas abajo de la cortina (lugar de las surgencias).

Composición química de los suelos.

La composición química de los suelos (tabla I) está muy relacionada con los procesos de erosión, además el caso de los suelos carbonatados merece una atención especial, ya que el CO_3^{2+} se hidroliza ($\text{CO}_3^{2+} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_3\text{H}$) y toda sustancia que se disuelva en el agua y aporte H^+ , y en menor grado por aumento de la fuerza iónica, desplaza el equilibrio hacia la derecha y disminuye la concentración de CO_3^{2+} , lo que equivale a aumentar la solubilidad del mineral carbonatado, pues el $(\text{CO}_3\text{H})\text{Ca}$ es soluble y no alcanza su producto de solubilidad. Este efecto es producido por la hidrólisis del CO_2 que aquí juega un papel primordial en este proceso.

Como se puede apreciar en la tabla I, en los suelos de la Capa 2 predomina la presencia de carbonato hidratado, el cual constituye entre el 30 y 50 % del total de sales solubles contenidas en el mismo. Esto demuestra, teniendo en cuenta lo anteriormente explicado, que dicho suelo es potencialmente soluble.

CONCLUSIONES

1. Las filtraciones que se producen en la presa están asociadas a los suelos de la Capa 2. Esto se explica por:
 - Su constitución granulométrica: más del 60 % del material está constituido por gravas y arenas, además presenta abundantes fragmentos de caliza carsificados dispuestos caóticamente.
 - Altamente permeable: debido a su constitución granulométrica es permeable desde la construcción de la presa, independientemente del estado actual.
 - Presencia de finos con alto contenido de carbonato de calcio: baja cohesión y plasticidad que le permiten ser fácilmente erosionados.
 - Su posición en el corte: aflora en el embalse y aguas abajo de la cortina (fundamentalmente en la zona de surgencia de las filtraciones). Tiene continuidad vertical y horizontal.
2. Estos fenómenos de erosión subterránea de los suelos (especialmente la **tubificación**), se producen independientemente de la naturaleza dispersiva de los mismos, está demostrado que en suelos carbonatados no dispersivos, con heterogeneidad granulométrica y sometidos a una carga hidráulica es potencialmente posible su desarrollo.



3. A pesar de la semejanza en la composición química de las diferentes capas, así como en otras propiedades geotécnicas (tabla II), la ocurrencia del proceso descrito anteriormente no ha sido posible en el resto de las capas por lo siguiente:

- La Capa 1 se encuentra cerca de la superficie y de forma continua, pero clasifica como una arcilla arenosa con pocas gravas y alto contenido de limos. Tiene baja permeabilidad.
- La Capa 3 posee elevada potencia y continuidad pero sus características físicas son similares a la 1 y su permeabilidad es baja; la Capa 3a es una arcilla de alta plasticidad, considerada prácticamente impermeable. En cambio la Capa 3b clasifica como una grava pero no tiene continuidad y yace profundamente en el corte.
- La Capa 4 no tiene continuidad y yace profundamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Arma R. y Echemendia A. (2000). Causa de falla por sifonamiento de la presa Las Cabrera: Caso histórico. Memorias del Primer Simposio Internacional "La Geodesia y Geomecánica Aplicadas a la Construcción", T. I, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Custodio E. y Llamas M. R. (1996). Hidrología Subterránea. 2^{da} Edición, Edición Omega S. A, Barcelona, España.
- Díaz T., San Roman N. y otros (2000). Solución de filtraciones Margen Izquierda Presa Zaza. E.I.P.H. Villa Clara.
- Jiménez Salas J. A. y De Justo J. L. (1975). Geotecnia y Cimientos, T.I, Segunda Edición, Editorial Rueda, Madrid, España.
- Lomtadze V. D. (1977). Geología Aplicada a la Ingeniería Geomecánica Aplicada a la Ingeniería. Traducción del Ruso.
- Sowers G. B. y Sowers G. F. (1972). Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentación. Primera Parte. Editorial Limusa-Wiley, España.

Tabla I. Composición química de los suelos de la Capa 2.

Composición química de los cables de la Capa 2:										
	SALES SOLUBLES TOTALES me / l - mg / l									
CALA	CO3H	CL	SO4	Ca	Mg	K	Na	TOTAL	PH	CO
7	0.45	0.5	0.38	0.8	0.3	0.01	0.22	0.0912	8.0	0.10
	0.027	0	0.0182	0.016	0.0036	0.0004	0.0051			0.003
10	0.7	0.1	0.02	0.8	0.2		0.22	0.0877	8.0	0.10
	0.043	0	0.001	0.016	0.0024		0.0051			0.003
22	0.6	0.7	0.12	0.8	0.1		0.52	0.0991	7.9	0.10
	0.037	0	0.0058	0.016	0.0012		0.012			0.003



Tabla II. Resumen de las propiedades geotécnicas de los suelos.

PARÁMETROS	UM	CAPAS					
		CORTINA	1	2	3	3 a	3 b
Grava	%	9	14	47	16	6	63
Arena	%	47	25	19	30	14	22
Limo	%	15	34	19	28	30	11
Arcilla	%	29	27	16	26	51	8
Límite Líquido	%	40.2	31.4	30.5	34.9	69.7	30.5
Límite Plástico	%	19.2	17.8	16.4	17.4	26.7	16.4
Índice Plástico	%	21.0	13.7	14.1	17.5	43.0	14.1
Humedad Natural	%	22.6			18.9	39.7	
Densidad Húmeda	g/cm ³	2.00			2.08	1.81	
Densidad Seca	g/cm ³	1.63			1.75	1.30	
Relac. de Vacíos	-	0.667			0.576	1.093	
Saturación	%	90			90	97	
Peso Específico	-	2.72			2.75	2.71	
Cohesión Lento	Kg/c ²	0.29			0.27	0.32	
Ángulo Fricción L.	°Sex.	17			19	9	
Cohesión Rápido	Kg/c ²	0.56			1.19	10	
Áng. Fricción Ráp.	°Sex.	11			12	0.69	
Mód. Deformación	Kg/cm ²	167			279	272	
Coef. Compresib.	Cm ² /kg	0.0111			0.012	0.0067	
Coef. Consolid.	Cm ² /seg.	0.00629			0.000	0.00163	
Clasificación	-	CL	CL	GC	CL	CH	GC

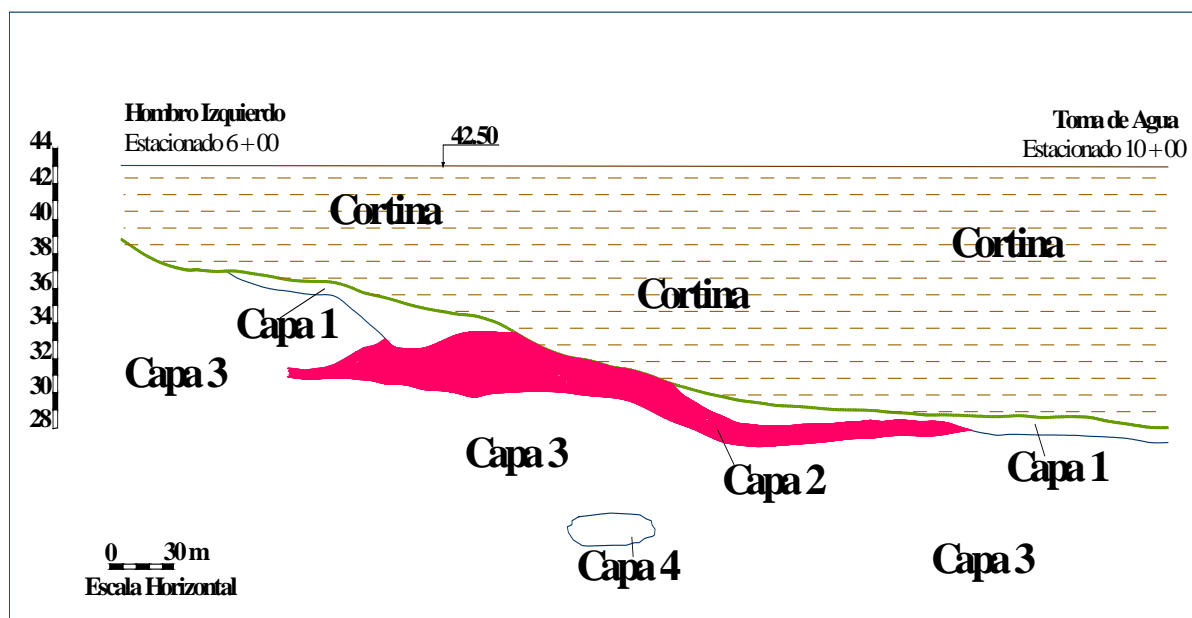


Figura 1. Perfil geotécnico longitudinal del tramo investigado.

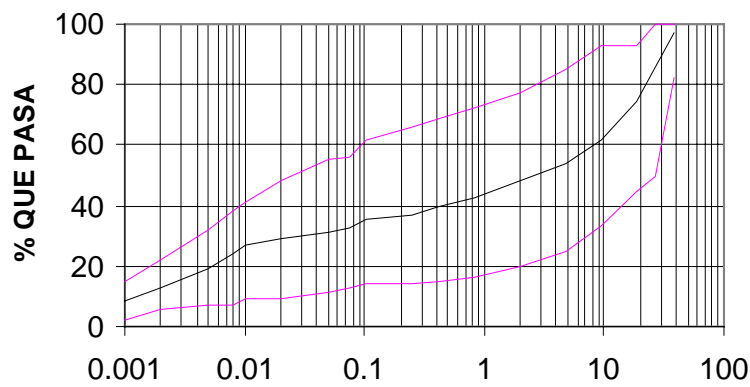


Figura 2. Rango granulométrico de la capa 2.

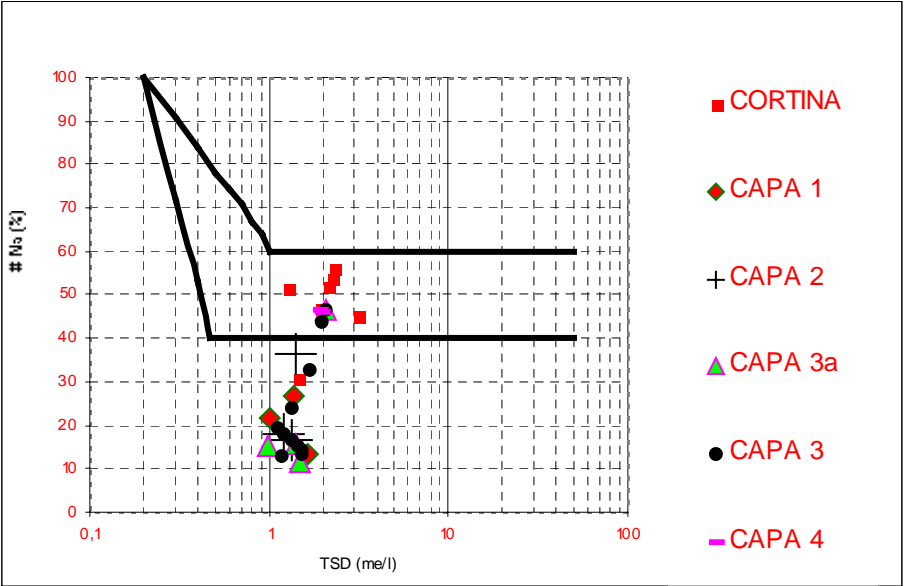


Figura 3. Gráfico de dispersión.

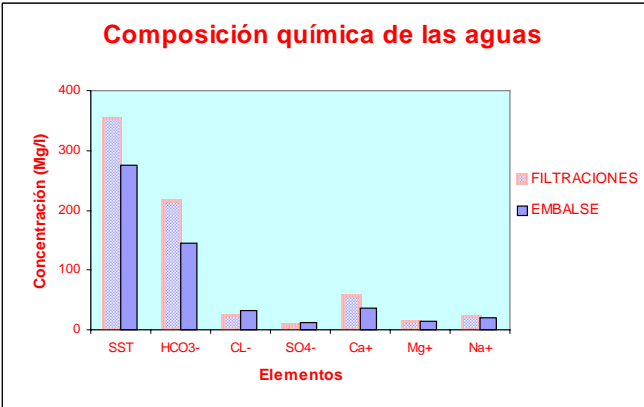


Figura 4. Composición química de las aguas.



INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS EN SUELOS EXPANSIVOS.

Ing. Neldo P. San Román Pérez⁽¹⁾, Ing. José L. Peñate Fleites⁽¹⁾, MSc. Ing. Fermín E. Sarduy Quintanilla⁽¹⁾, MSc. Domingo E. Delgado Martínez⁽²⁾ y Dr. Gilberto Quevedo Sotolongo⁽²⁾

- (1) Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara. Ave. Libertadores # 201 e/ Jesús Menéndez y Danielito. Santa Clara 4. Cuba, CP 50400. Correo electrónico: eiphvc@ip.etecsa.cu.
- (2) Universidad Central de Las Villas. Facultad de Construcciones. Carretera de Camajuaní km 5½. Santa Clara. Correo electrónico: domingo@uclv.etecsa.cu

RESUMEN.

En Cuba se ha reconocido la existencia y, hasta cierto punto, abundancia de suelos expansivos. Autores de renombre mundial citan a nuestro país entre los lugares donde existen problemas relacionados con la expansividad de las arcillas. La gran importancia que tiene estos fenómenos propios de las arcillas expansivas en estado de no saturación motivó la realización de este trabajo.

Aunque el tema de los suelos expansivos es muy tratado en la literatura internacional, son pocos los que han realizado propuestas metodológicas para la evaluación integral del fenómeno. El propósito de la metodología elaborada es sugerir una guía para la evaluación de la expansividad de los suelos que puede ser aplicada a situaciones prácticas.

En el trabajo se abordan una serie de tareas que deben ser cumplidas en las investigaciones, entre las que se destacan: la identificación y clasificación del problema de la expansividad, la determinación del espesor de la capa activa, la cuantificación de las características de expansión, el cálculo del levantamiento de la capa activa y, por último, la elección de la solución. En la solución de estas tareas se proponen ensayos de laboratorio, métodos de predicción y de cálculo que resultan novedosos. Los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología en las investigaciones que se realizan en la E.I.P.H. de V.C. han sido satisfactorios.

APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXPANSIVIDAD DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

Introducción

El problema de los suelos expansivos existe prácticamente en todas partes del mundo, y Cuba no está exenta del mismo. Sus efectos, el levantamiento, rotura y daño de pavimentos, edificaciones ligeras, revestimientos de canales y embalses, ocasionan cuantiosas pérdidas.

El volumen de investigaciones y publicaciones sobre este tema en Cuba, es desproporcionalmente bajo con relación a los problemas creados en obras. Dada su importancia se realizó este trabajo, que tuvo como objetivos:

1. Aplicar una metodología para la evaluación de la expansividad de los suelos arcillosos que permita la identificación del problema, su cuantificación y selección de la solución.
2. Determinar experimentalmente los ensayos de laboratorio que permiten una evaluación más precisa del comportamiento real de los suelos expansivos, teniendo en cuenta el equipamiento existente en los laboratorios de mecánica de suelo del país.

Se debe destacar que para la evaluación de la expansividad se parte del criterio de que los cambios de volumen se producen como consecuencia de la variación de la presión efectiva del suelo, ya sea por causas externas o internas. Desde este punto de vista, la naturaleza expansiva de los suelos, dada fundamentalmente por el contenido de minerales arcillosos de estructura laminar expansiva, es una condición necesaria, pero no suficiente para que el fenómeno ocurra.

Valoración de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología

A continuación se brindan los resultados obtenidos en las investigaciones para la construcción de una base de almacenes de CUBALSE, al sur de la provincia de Ciego de Ávila, en suelos de la formación geológica Villarroja al aplicar la metodología propuesta.

Tareas que se llevan a cabo en la metodología aplicada:

- Identificación y clasificación del problema.
- Determinación del espesor de la capa activa.
- Cuantificación de las características de expansión.
- Cálculo del levantamiento de la capa activa.
- Elección de la solución.

A las dos primeras tareas se le dio cumplimiento en una primera etapa y las restantes en una segunda.

1. Identificación y clasificación del problema. El objetivo que se persigue es: Determinar si el suelo potencialmente expansivo existe o no. Si existe, ¿cuál es el grado de atención que necesita?

En esta etapa el primer paso es la *observación* y en la misma se le prestó atención a numerosos aspectos, entre los cuales se destacan: orografía, clima, cantidad de arcilla y posición del nivel freático.

Estos factores indicaban la existencia de suelos expansivos, pero a ese nivel de observación no se podía asegurar si eran activos o no, entonces se procedió a la observación del terreno. La detección del agrietamiento superficial, su magnitud, profundidad y separación de las grietas fue un indicio del grado de expansividad del suelo al rehidratarse.

En zonas pobladas la observación de las construcciones existentes, de sus grietas presentes o reparadas y las noticias recibidas de los ocupantes, bastan para establecer si existen o no problemas de expansividad. En zonas donde no existen construcciones ni se encuentren evidencias con la observación del terreno, habrá que recurrir a la toma de muestras y ensayos de laboratorio desde etapas tempranas de la investigación.

Ensayos de identificación y clasificación. Los ensayos utilizados con este fin son bastante variados y numerosos y pueden ser divididos en directos e indirectos

Los ensayos indirectos más utilizados son los de densidad natural, humedad, granulometría, hidrómetro y límites de Atterberg. Con fines de identificación y clasificación, se emplearon los resultados de estos ensayos y de sus combinaciones (índice de consistencia, actividad coloidal, densidad seca, etc.).

La aplicación de técnicas directas para determinar cuantitativamente las características del cambio de volumen de los suelos empleando para este fin un aparato de tipo edométrico, no es recomendable en esta primera etapa porque demora y encarece la investigación. Sólo en casos especiales sería recomendable la realización de estos ensayos, fundamentalmente los de hinchamiento libre e hinchamiento controlado, por la rapidez y sencillez de los mismos.

El corte ingeniero geológico obtenido para el área fue el siguiente:

0.00-0.15 m Capa vegetal

0.15-3.50 m Capa 1 Arcilla ligeramente arenosa de alta plasticidad (CH) Fm. Villarroja

3.50-10.00 m Capa 2 Sedimentos de la Fm Arroyo Palma representados por alternancias de calizas y margas, con intercalaciones de aleurolitas calcáreas y arcillas.

7.50 m Nivel freático

Como no existe ningún ensayo de identificación que permita asegurar si un suelo arcilloso producirá daños por expansión, se decidió estimar los índices de expansión a partir de la correlación de los resultados de las técnicas directas e indirectas.

Métodos de identificación y clasificación. Entre los diferentes métodos de identificación y clasificación se aplicó el desarrollado por el Departamento de Ingeniería Geológica de la E.I.P.H. de Villa Clara, el cual se adapta a las características de los suelos cubanos

Los pasos seguidos para la determinación de los índices de hinchamiento en este método fueron los siguientes:

- ⇒ Obtener las características granulométricas, de plasticidad, de humedad y de densidad seca a partir de ensayos de laboratorio o, en su defecto, de materiales de archivo.

- ⇒ Clasificar el suelo y ubicarlo en la carta de plasticidad en los rangos establecidos para verificar la susceptibilidad al hinchamiento.
- ⇒ Comprobar o tener referencias de que el suelo clasificado se encuentra en la zona de la capa activa donde las condiciones ambientales inducen cambios apreciables de la humedad.
- ⇒ Calcular la humedad final como el valor lógico más probable en función del límite líquido y la humedad natural, se puede considerar como el valor promedio el resultado de aplicar las ecuaciones 1 y 2.

$$w_f = w_n + 14,7 \quad (1) \quad \text{donde: } w_f = \text{humedad final en \%}$$

$$w_n = \text{humedad natural en \%}$$

$$w_f = LL - 20 \quad (2) \quad LL = \text{límite líquido en \%}$$

- ⇒ Calcular el hinchamiento libre como el valor lógico más probable en función de la consistencia del suelo y la arcillosidad o la densidad seca, a través de las ecuaciones 3 y 4.

$$\log h_l = 0,536 \cdot \log A + 0,672 \cdot I_c - 0,388 \quad (3) \quad \text{donde: } h_l = \text{hinchamiento libre en \%}$$

$$A = \text{contenido de arcilla en \%}$$

$$I_c = \text{Índice de consistencia}$$

$$h_l = 25 \cdot \gamma_d + 14,3 \cdot I_c - 38 \quad (4) \quad \gamma_d = \text{densidad seca natural en g/cm}^3$$

- ⇒ Determinar el hinchamiento controlado como una dependencia directa del hinchamiento libre mediante la ecuación 5.

$$\log h_c = 1,21 \cdot \log h_l - 1,31 \quad (5) \quad \text{donde: } h_c = \text{hinchamiento controlado}$$

Clasificar el suelo en base a su grado de expansión.

Tabla I. Clasificación del grado de expansión

A (%)	w_n/LL	h_l (%)	h_c (kg/cm ²)	Grado de expansión
< 20	>0,90	<4	<0,25	nulo
18 - 43	0,90 - 0,55	4 - 15	0,25 - 1,25	ligero
40 - 63	0,55 - 0,20	15 - 30	1,25 - 3,00	medio
>60	<0,20	>30	>3,0	alto

Al aplicar este método se corroboró que el suelo era susceptible al hinchamiento, se encontraba en la zona activa y los índices de hinchamiento pronosticados fueron: humedad final 32%, hinchamiento libre 17-20% y el hinchamiento controlado 1.6-2.0 kg/cm² Clasifica en base a su grado de expansión como: grado medio.

Se debe destacar que resultaría imprudente evaluar la expansividad solamente a partir de métodos de identificación y clasificación, aunque vale señalar que estos tienen dos aplicaciones muy importantes: primero, para evaluaciones preliminares y, segundo, para la interpolación, e incluso extrapolación, de los resultados de ensayos más complejos efectuados en algunos puntos del terreno.

A manera de resumen se puede decir que mediante la observación, los ensayos y el método descrito, se pudo llegar a un juicio acertado del problema existente y del grado de atención que necesita; pero se debe aclarar que en ningún caso existe una manera automática de llegar a esta solución.

2. Determinación del espesor de la capa activa. El objetivo que se persigue es: Analizar el perfil dinámico de succiones del suelo.

La forma del perfil dinámico de succión depende predominantemente de la disponibilidad de agua superficial, de la evapotranspiración, de la difusividad del suelo y de la posición del nivel freático; y de la potencia de la capa activa y la humedad de equilibrio.

Cuando no se dispone de medios adecuados para determinar el perfil de equilibrio se puede recurrir a ciertos indicadores que permiten estimar con gran facilidad el valor aproximado de la succión del suelo, una vez alcanzado el equilibrio como son: la relación entre la humedad natural y el límite plástico, la relación entre la humedad óptima del Proctor estándar y el límite plástico (Pousada Presa, 1984) o la relación entre el índice de fluidez (o de consistencia) y la profundidad, que fue la empleada en la investigación.

El método consiste en plotear los valores del índice de fluidez o el de consistencia contra la profundidad, a partir de muestras de suelos obtenidas preferentemente en varias épocas del año. La zona activa se extendería entonces hasta la profundidad en la cual uno de estos índices toma valores similares o dentro de un rango estrecho en las distintas épocas del año.

Los índices analizados indican por sí mismo un déficit de humedad en el suelo $I_f < 0$ ($I_c > 1$), o sea, la humedad natural del suelo se encuentra muy por debajo de la humedad de equilibrio. Los resultados demostraron que todo el espesor de capa 1 se corresponde con la zona activa y que el nivel freático (profundo) no influye sobre el perfil de humedades del suelo, el cual es controlado por los procesos de evaporación-infiltración desde la superficie.

Otros aspectos a considerar en la determinación de la capa activa son: el efecto de protección de los agentes atmosféricos que tienen las construcciones sobre la capa activa; además, que pueden aportar otros efectos secundarios, entre ellos cabe destacar: las modificaciones de las condiciones de drenaje superficial, las fugas en las redes de abastecimiento o saneamiento, las evaporaciones localizadas por calentamientos provocados por hornos y calderas, la pérdida de agua por la presencia de árboles.

3. Cuantificación de las características de expansión. El objetivo que se persigue es: si el suelo es expansivo, ¿cuál es el valor numérico más racional de los índices del hinchamiento?

Para la cuantificación de la expansividad de un suelo se emplean técnicas que, se pueden dividir en dos grupos: ensayos de inundación y ensayos de succión controlada. El último grupo no fue utilizado porque no se cuenta con el equipamiento adecuado.

Ensayos de expansión con inundación. De los diversos métodos de ensayo con imbibición total, se analizan los que están normalizados en el país y otros de gran utilidad que fueron realizados con los equipos tradicionales de mecánica de suelos.

Una vez comprobado el espesor de la capa activa, y coincidiendo con el mismo período seco se realizó una campaña de sondeos para la toma de muestras inalteradas (shelbys). Las muestras fueron tomadas a intervalos de profundidad de 30 cm.

Los ensayos realizados para la cuantificación de las características de expansión fueron hinchamiento libre, edómetro doble, edómetro simple modificado y edómetro a volumen constante. Se realizaron otros ensayos físico-mecánicos típicos de la etapa, que incluyen, los necesarios para el cálculo de los ensayos de expansión.

Para el procesamiento y análisis de los resultados, se dividió la capa activa en dos intervalos: uno superior (0,15 a 2,0 m) y otro inferior (2,0 a 3,5 m). Entre los dos intervalos sólo se evidencia una pequeña diferencia de humedades; pero la división no está basada en un criterio estadístico, sino en un fin práctico. Dividir la capa activa en intervalos, permite ganar en precisión en el cálculo del levantamiento de la capa activa. La sobrecarga de tierra promedio para el primer intervalo es de 0,26 kg/cm² y para el segundo, 0,54 kg/cm².

a) Ensayo de hinchamiento libre

El ensayo se realizó en el **aparato de hinchamiento relativo libre**, según la norma cubana NC 054-306-85. Los valores obtenidos del hinchamiento libre y la humedad de equilibrio aparecen en la tabla II.

Tabla II. Resultados del ensayo de hinchamiento libre

Intervalo (m)	Índices		
	Δe	h_L (%)	w_f (%)
0,15 – 2,00	0,21	12,45	33,1
2,00 – 3,50	0,25	14,70	33,6

Los resultados del hinchamiento libre y la humedad de equilibrio obtenidos en un edómetro convencional, si se considera la sobrecarga de tierras, difieren de los anteriores (Tabla III)

Tabla III. Valores de h_L y w_f según el ensayo edométrico simple modificado

Intervalo (m)	Índices		
	Δe	h_L (%)	w_f (%)
0,15 - 2,00	0,1643	9,76	31,42

2,00 - 3,50	0,1917	11,23	32,97
-------------	--------	-------	-------

En el **aparato de hinchamiento relativo libre** se obtienen valores más elevados del hinchamiento libre y la humedad de equilibrio. Como los anillos de este equipo tienen solamente 10 mm de altura se logra una saturación total de la muestra (más rápida) y como el volumen es menor, las dispersiones son mayores. En esto último también influye la precisión del equipo sin carga de confinamiento.

b) Ensayo de hinchamiento controlado

El ensayo no se realizó, pero si se utilizan los resultados de la primera parte del ensayo edométrico a volumen constante se pueden obtener los mismos resultados que realizando el ensayo por la NC 054-350-86. La carga contra hinchamiento para la parte superior de la capa activa es de 3,14 kg/cm² y para la parte inferior, 2,50 kg/cm².

El ensayo de hinchamiento controlado puede considerarse incompleto porque no brinda información sobre las deformaciones (expansión). Para obtener una información más completa se debe proseguir el ensayo descargando progresivamente el edómetro y dejando que se establezca la deformación para cada decremento de carga. Los métodos más usados para el cálculo del levantamiento de la capa activa no utilizan directamente los resultados del ensayo.

c) Ensayo edométrico doble (Jennings y Knight, 1957)

Para la interpretación de los resultados se construyeron los gráficos de **e vs σ** . En el anexo 1 se muestra el gráfico para un intervalo de la zona activa.

Este método se basa en suponer que, inicialmente, ambas muestras son idénticas, aunque es inevitable que existan diferencias entre los índices de poros iniciales; por lo tanto, se corrige este desajuste desplazando una de las curvas. En este caso se desplaza la curva de humedad natural hasta hacer coincidir los índices de poros iniciales de ambas muestras. La intersección de ambas curvas corresponde a la presión de hinchamiento del suelo. En los gráficos, para ilustrar la forma de determinación de Δe y el hinchamiento probable, se asume una carga de proyecto (**p'**). Los resultados aparecen en la tabla IV.

Tabla IV. Interpretación de los resultados del edómetro doble

Intervalo (m)	Índices			
	Δe	h_{prob} (%)	w_f (%)	h_c (kg/cm ²)
0,15 - 2,00	0,03	1,8	26,18	1,80
2,00 - 3,50	0,07	4,1	28,31	2,80

De los resultados de este ensayo se puede inferir una disminución significativa de los valores de hinchamiento probable (considerando las sobrecargas de tierra y de la estructura) en comparación con los hinchamientos máximos que se obtienen en el ensayo de hinchamiento libre o en el mismo edómetro doble a partir de la curva con la muestra inundada.

Para la realización de este ensayo se requiere llevar las muestras hasta presiones muy elevadas, más de 8,0 kg/cm², para poder localizar con claridad la rama virgen de la curva edométrica, lo cual puede resultar una limitación del ensayo.

d) Ensayo edométrico simple modificado (Ralph y Magor, 1972)

Este ensayo trata de resolver las limitaciones fundamentales del ensayo edométrico doble. En el anexo 2 se muestra el gráfico promedio obtenido para la relación de **e vs σ** en un intervalo de la capa activa.

En este ensayo se parte del supuesto de que la curva edométrica es prácticamente horizontal en el tramo inicial (hasta la carga **p₀**) y se acepta como **e₀** el valor correspondiente a la presión igual a 0,07 kg/cm². De esta forma, el ensayo elimina las incertidumbres asociadas a las diferencias entre los índices de poros de las muestras adyacentes (edómetro doble) y la necesidad de llevar el ensayo hasta presiones muy altas. En el anexo 2 se ilustra la forma de determinación de Δe , y los resultados obtenidos aparecen en la tabla V.

Tabla V. Interpretación de los resultados del edómetro simple modificado

Intervalo (m)	Índices			
	Δe	$H_{(prob)}$	w_f	h_c (kg/cm ²)
0,15 - 2,00	0,06	3,5	27,28	1,75



2,00 - 3,50	0,08	4,7	28,97	2,50
-------------	------	-----	-------	------

e) Ensayo edométrico a volumen constante (Sullivan y McClelland, 1969)

En el anexo 3 se muestra el gráfico promedio obtenido para la relación de **e vs σ** en un intervalo de la capa activa. Los valores de Δe obtenidos de los gráficos aparecen en la tabla VI (procedimiento convencional).

Tabla VI. Interpretación de los resultados del edómetro a volumen constante

Intervalo (m)	Índices			
	Δe	h_{prob} (%)	w_f (%)	h_c (kg/cm ²)
0,15 - 2,00	0,02	1,2	24,63	3,14
2,00 - 3,50	0,018	1,1	26,14	2,50

La diferencia del procedimiento propuesto por Sullivan y McClelland (1969) para este ensayo, en relación con el convencional, radica en que se hace una interpretación de la curva **e vs log p** en términos de tensiones efectivas. Para este caso las condiciones de tensión efectiva final (σ'_f) e inicial (σ'_i) se determina aplicando la siguiente versión modificada de la ecuación clásica de tensiones efectivas (σ'):

$$\sigma' = \sigma - \chi \cdot p''$$

donde: χ = parámetro que representa la parte de la succión del suelo que contribuye a la tensión efectiva

$$\sigma'_i = p_0 + \chi \cdot p''_i$$

$$\sigma'_f = p_0 + \Delta p + \chi \cdot p''_f$$

Los valores del parámetro χ , que varían entre 1 y 0, fueron obtenidos a partir de los trabajos experimentales de Blight (1965 y 1967). La magnitud de la succión se obtiene gráficamente y aparece representada en el anexo 3.

Los valores de Δe obtenidos a partir de las propuestas de Sullivan y McClelland (1969) resultan inferiores a los del procedimiento convencional (Tabla VII).

Tabla VII. Interpretación de los resultados del edómetro a volumen constante. (Sullivan y McClelland, 1969)

Intervalos (m)	Índices							
	p'' (kg/cm ²)	χ	σ'_i (kg/cm ²)	σ'_f (kg/cm ²)	Δe	p_{prob} (%)	w_f (%)	h_c (kg/cm ²)
0,15 - 2,00	2,88	0,50	1,70	1,13	0,012	0,7	24,48	3,14
2,00 - 3,50	1,98	0,55	1,63	1,30	0,005	0,3	25,92	2,50

En el análisis de los resultados del ensayo edométrico a volumen constante se aprecia cómo la presión de hinchamiento es extremadamente sensible a los cambios de volumen y cómo en el proceso de expansión el tiempo necesario para que se alcance el equilibrio es menor cuando la presión aplicada es mayor.

f) Ensayo edométrico con muestras dobles inundadas (Holtz, 1970)

Este ensayo se realizó, a partir de realizar una interpretación conjunta del ensayo edométrico simple modificado y del ensayo edométrico a volumen constante como si se tratara del ensayo propuesto por Holtz (1970). Para esto sólo es necesario que los ensayos se realicen con la misma muestra.

El análisis del anexo 4 permite una mejor comprensión de la influencia del historial de tensiones y del proceso de humectación.

Las curvas edométricas **A** y **B** se obtienen con dos muestras distintas, la **A** se inunda manteniendo el volumen constante y después se descarga por escalones desde la máxima presión (edómetro a volumen constante), y la **B**, partiendo de 0,07 kg/cm², una vez que se inunda y estabiliza, se va cargando con incrementos (edómetro simple modificado). La curva edométrica **C** sería equivalente a cargar varias muestras similares a presiones diferentes y después inundarlas. Según Holtz (1970), una forma aproximada que se suele considerar para interpolar la curva **C** consiste en pasarla por los puntos correspondientes al hinchamiento libre de la curva **B** y la presión de hinchamiento de la curva **A**.

Los resultados del ensayo se utilizan para obtener los límites donde se situarán las estimaciones del cambio de volumen. Un hecho importante, que se desprende del análisis del anexo 4, es la posibilidad

de reducir considerablemente la capacidad de hinchamiento vertical de las arcillas expansivas, aplicando incrementos de cargas relativamente pequeñas, y de evitar el desarrollo de fuertes presiones, permitiendo pequeñas deformaciones. En la tabla VIII aparecen los resultados obtenidos para la curva **C**, que es la estimación del cambio de volumen para muestras cargadas con presiones intermedias, e inundadas.

Tabla VIII. Interpretación de los resultados del ensayo edométrico con muestras dobles inundadas

Intervalo (m)	Índices			
	Δe	$h_{\text{prob}} (\%)$	$w_f (\%)$	h_c (kg/cm ²)
0,15 – 2,00	0,048	2,85	27,22	2,50
2,00 - 3,50	0,025	1,50	24,84	3,14

En el análisis conjunto de ambos ensayos se aprecia cómo la presión de hinchamiento se evalúa con más exactitud por medio de ensayos con inundación a volumen constante, que por medio de ensayos de expansión con posterior consolidación.

4. Cálculo del levantamiento de la capa activa El objetivo que se persigue es calcular la magnitud del levantamiento de la capa activa y una vez cuantificadas las características de expansión (índices de hinchamiento) del suelo, en base a los ensayos edométricos con inundación que fueron realizados, se hace necesario calcular el levantamiento de la capa activa.

Entre los diversos métodos que existen para el cálculo del levantamiento en base a los ensayos edométricos con inundación, solamente fueron utilizados aquellos basados en modelos matemáticos que utilizan los parámetros obtenidos. Los modelos semiempíricos no fueron utilizados pues resulta riesgosa su utilización sin una comprobación previa.

Los métodos de cálculo que se emplearon fueron los propuestos por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (1961), por Jennings y Knight (1957) y por Sullivan y McClelland (1969). Los cálculos se realizaron a partir de una profundidad de la capa activa de 0,5 m, pues prácticamente cualquier solución de cimentación tendría un nivel de desplante por debajo de esta profundidad. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla IX.

Las diferencias obtenidas en el levantamiento de la capa activa radican fundamentalmente en que unos ensayos consideran el efecto de las sobrecargas de tierra y de la estructura y otros no; además, el método propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos aplica un coeficiente empírico de $\frac{1}{2}$ para reducir la magnitud del levantamiento.

Tabla IX. Levantamiento estimado de la capa activa

Ensayos	Parámetros y métodos de cálculo del levantamiento				
	$H_{\text{prob}} (\%)$	Δe	Método del Cuerpo de Ingenieros de los E.U.A. $h = \frac{1}{2} \cdot H \cdot h_{\text{max}}$ (cm)	Método de Jennings y Knight $h = \sum \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot H$ (cm)	Método de Sullivan y McClelland $h = \frac{\Delta f}{1 - f_0} \cdot H$ (cm)
Hinchamiento libre a) Aparato de hinchamiento libre relativo	12,45	0,21			
	14,70	0,25	20,36 **	40,78 **	-
b) Edómetro convencional	9,76	0,16			
	11,23	0,19	15,74 **	31,49 **	-
Edómetro doble	1,8	0,03			
	4,1	0,07	4,42	8,85 *	-
Edómetro simple modificado	3,4	0,06			

	4,7	0,08	6,07	12,15 *	-
Edómetro a volumen constante					
a) Análisis convencional	1,2	0,02			
	1,1	0,01	1,72	3,45	-
b) Según Sullivan y McClelland	0,7	0,012			
	0,3	0,005	-	-	1,50 *
Edómetro con muestras dobles inundadas	2,85	0,048			
	1,50	0,025	3,26 *	6,52	-
* Resultados del cálculo del levantamiento de la capa activa que utilizan los ensayos o el equivalente a los recomendados por los autores del método.					
** Resultados del cálculo del levantamiento de la capa activa que no consideran el efecto de las sobrecargas de tierra y de la estructura.					

5. Elección de la solución

Por medio de esta metodología podemos llegar a calcular o, al menos, estimar la profundidad de la capa activa, los levantamientos del terreno y su dependencia de las presiones totales que sobre el mismo se aplican. Con ello estamos en disposición de poder obtener los esfuerzos que los posibles movimientos pueden producir en la cimentación o en las mismas estructuras cimentadas.

Para resolver los problemas de los suelos expansivos en la ejecución de una obra sólo existen dos vías: evitarlos o utilizar sus propiedades. La primera vía de solución es la más fácil, más antieconómica y mediocre. La segunda vía requiere de investigaciones detalladas, estudio y razonamiento de las formas para evitar las dificultades que los agentes negativos pudieran traer a la obra. Las soluciones constructivas pueden clasificarse en dos grupos: actuación sobre la estructura y actuación sobre el terreno. Queda en manos de los proyectistas aprovechar al máximo las posibilidades que puedan brindar los suelos expansivos y economizar, con valores aceptables de seguridad, a la hora de cimentar las obras.

Conclusiones.

- El método de identificación y clasificación empleado brinda buenas aproximaciones para ser aplicado en etapas preliminares de la investigación.
- Cuando no se dispone de medios para determinar el perfil de equilibrio del suelo se pueden emplear algunos índices empíricos.
- Los valores del hinchamiento libre y la humedad de equilibrio (final) obtenidos mediante el ensayo en el aparato de hinchamiento libre relativo son mayores que los que se obtienen en un edómetro (consolidómetro) convencional, esto se debe a una saturación total más rápida de la muestra, con dispersiones mayores de los resultados.
- Los resultados demuestran que la técnica de hinchamiento libre utilizada actualmente en Cuba sobrevalora el levantamiento de la capa activa, y que el ensayo de hinchamiento controlado resulta incompleto pues no brinda información sobre las deformaciones; por lo que se considera factible, dada su sencillez y rapidez, su utilización en la evaluación cualitativa de la expansividad de los suelos y el análisis de la necesidad de realizar ensayos más complejos o no.
- En el ensayo edométrico simple modificado, se resuelve gran parte de las limitaciones del ensayo edométrico doble con una sola muestra.
- La presión de hinchamiento se evalúa con más precisión por medio de ensayos con inundación a volumen constante que por medio de ensayos de expansión con posterior consolidación, siendo extremadamente sensible a los cambios de volumen.



- En el proceso de expansión, el tiempo necesario para que se alcance el equilibrio es menor cuando la presión aplicada es mayor.
- El ensayo edométrico simple modificado y el ensayo a volumen constante, así como la interpretación conjunta de ambos ensayos como si se tratase del de muestras dobles inundadas pueden resolver los problemas de la cuantificación experimental del fenómeno de la expansividad..
- Los modelos para la cuantificación del levantamiento de la capa activa, según, demuestran cómo las técnicas de hinchamiento libre utilizadas actualmente en Cuba sobrevaloran el levantamiento de la capa activa y cómo las nuevas técnicas introducidas permiten evaluaciones más realistas del fenómeno.
- La metodología aplicada propone una serie de tareas a las que se le puede dar cumplimiento en diferentes etapas y por vías diversas, pero que resultan obligatorias a la hora de evaluar la expansividad de los suelos.

Bibliografía

- HOLTZ, W.G. (1970). "Suggested Method of Test for One Dimensional Expansion and Uplift Pressure of Clay Soils", *Special Technical Publication 479*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials.
- JENNINGS, J.E.B. Y KNIGHT, K.H. (1957). "The prediction of Total Heave from the Double Edometer Test", en *Symposium on Expansive Clays*, The South African Institute of Civil Engineers, pp. 13-19.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A.; DE JUSTO ALPAÑEZ, J. L. (1975). *Geotecnia y Cimientos III: Propiedades de los suelos y de las rocas*, 2 ed., Madrid: Editorial Rueda, t. 2, 2da de., 999 p.
- MONZÓN, V. (1976). "Suelos Expansivos", *Voluntad Hidráulica*, La Habana, Vol.40 (diciembre), 1976, pp.13-27.
- POUSADA PRESA, E. (1984). *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Centro de Estudios de Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 269 p.
- RALPH, T.K. y MAGOR, N. (1972). "The Prediction of Heave from Laboratory Test", *South African Building Institute Bulletin*, N° 8, pp. 23-34.
- SULLIVAN, R.A. Y MCCLELLAND, B. (1969). "Predicting Heave of Buildings on Unsaturated Clay", en 2nd *International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas, pp. 404-420.