

# DETERMINACION DEL GRADO DE AGRESIVIDAD Y DE LA INTENSIDAD DE DENUDACION QUIMICA DE LAS AGUAS CARSICAS

J.R. Fagundo<sup>1</sup> y M. Pulina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigaciones Científicas y <sup>2</sup>Universidad de Silesia, Polonia

**ABSTRACT.** Different methods for determination of the water aggressivity and the intensity of karstified massif chemical denudation are discussed.

**RESUMEN.** Se discuten diferentes métodos de determinación de la agresividad de un agua, así como de la intensidad del proceso de denudación química en los macizos carsificables.

## INTRODUCCION

El carso o karst es el resultado del proceso de interacción químico-física entre las aguas naturales y las rocas solubles (salinas, sulfatos y carbonatos), caracterizado por el predominio en el relieve de las formas de corrosión química, tales como: lapiaz (diente de perro), ponores (sumideros), dolinas, poljes (valles cársicos), cuevas, resurgencias, emergencias, etc., además, por el predominio del drenaje subterráneo sobre el superficial.

Como región típica que presenta este tipo de morfología y de drenaje, se ha tomado la meseta conocida como del Karst (Yugoslavia) o del Carso (Italia), en los Alpes Dináricos; de ahí el origen de los términos cársico o kárstico, utilizados por los geomorfólogos e hidrogeólogos para referirse a los procesos de intemperismo que tienen lugar en regiones con similar paisaje y tipo de roca. El principal agente generador de esta morfología, es el agua natural o agua cársica, el cual se puede considerar a su vez, como un sistema heterogéneo constituido por 3 fases: líquido (fase acuosa donde además de moléculas de  $H_2O$  se encuentran presentes iones disueltos: gas ( $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $O_2$ ) y sólido ( $CaCO_3$ ,  $CaMg(HCO_3)_2$  y otros minerales).

El proceso de carsificación se origina durante las precipitaciones (lluvia o nieve) y en su paso por la zona del suelo, el agua toma de éste el  $CO_2$ ; así como pequeñas cantidades de ácidos húmicos y fúlvicos, que se producen principalmente en el proceso de descomposición de la materia orgánica. En estas condiciones las aguas se hacen agresivas y son capaces de disolver los minerales solubles constitutivos de las rocas carsificables. A medida que se lleva a cabo este proceso, las aguas naturales, en su trayectoria superficial o subterránea van perdiendo su agresividad respecto a los minerales calcita, dolomita, yeso y otros, convirtiéndose en aguas incrustantes, las cuales pueden permanecer en estado de sobresaturación hasta que encuentren condiciones favorables para la precipitación del exceso de minerales disueltos. Estas condiciones pueden ser la pérdida de caudal, la presencia de pendientes en el curso de un arroyo, el acceso a una cavidad aireada (en las cuevas) y cambios en la presión parcial de  $CO_2$  o de temperatura.

Un agua que ha alcanzado la saturación, no obstante, puede hacerse de nuevo agresiva y volver a ser incrustante por determinados factores (efecto salino, mezcla de agua con diferente presión de  $CO_2$ , efecto de ion común, etc.).

La agresividad de un agua o su capacidad para disolver los minerales solubles está relacionada con la denudación química, que es una medida de la intensidad de disolución de los macizos cársicos por las aguas naturales. La denudación química depende además de los caudales de las corrientes que se escurren a través de estos macizos.

En este trabajo se discuten diferentes métodos de medición del grado de agresividad de un agua (o capacidad de estas para disolver los minerales solubles); así como de la intensidad de la denudación química en los macizos cársicos.

## Medición de la agresividad de las aguas cársicas

Johnston y Williamson (1) desarrollaron un trabajo teórico bastante completo sobre el sistema  $CO_2-H_2O-CaCO_3$ , así como crearon las bases para la interpretación de los procesos de la disolución de los carbonatos. A principio de la década del 30, Tillmans (2) determinó la saturación límite de una solución de  $CaCO_3$  en relación con el contenido de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el pH y la temperatura. Como resultado de este trabajo se creó un diagrama de estabilidad de los compuestos del carbono posteriormente popularizado por Trombe (3) quien lo utilizó para medir la agresividad de las aguas cársicas (ver Figura 1).

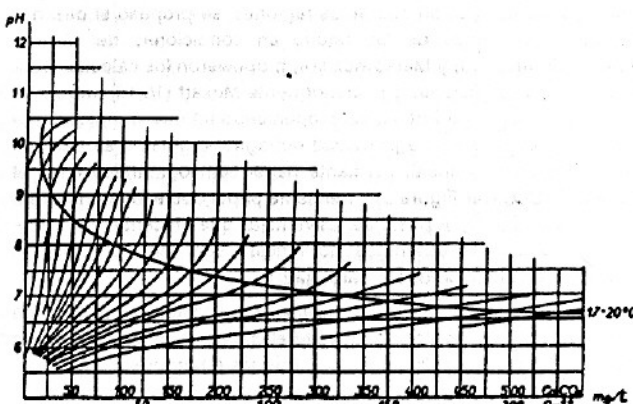


FIGURA 1. Diagrama de Tillmans-Trombe.(3)

Los experimentos de Tillmans se basan en la relación que existe entre dureza ( $CaCO_3$ ),  $CO_2$  y pH. Sin embargo, en condiciones naturales estas relaciones no resultan muy satisfactorias, como se demuestra en los resultados efectuados en el período 1969-1970 en los Tatras Occidentales por Pulina.(4) Otros investigadores como Laptiew (1939), Miller (1952), Sztieriny y Florove (1952), Trombe (1952), Wlasova y otros (1964), Roques (1962, 1963, 1964) y Swysen (1971), realizaron experimentos, en laboratorio, sobre la disolución de los carbonatos, similares a los efectuados por Tillmans, donde se tomó en cuenta, además de las relaciones del  $CaCO_3$  con el  $CO_2$  y la temperatura (5), los diferentes tipos petrográficos, así como los aspectos relacionados con la cinética del proceso de disolución.

Los estudios teóricos y experimentales mencionados en el párrafo anterior no llegaron a resolver los problemas, que ocurren en la naturaleza en relación con la disolución de los carbonatos. Los experimentos se efectuaron en condiciones de sistema cerrado, que

son menos típicos en condiciones naturales. A pesar de que estos trabajos permitieron obtener el límite teórico de saturación de  $\text{CO}_2$  para diferentes temperaturas, no ofrecieron la posibilidad de medir la velocidad de estos procesos. En trabajos posteriores se han abordado estos aspectos. (6-7)

Un método de medición de la agresividad del agua se basa en la denominada agresividad potencial, la cual consiste en determinar la posibilidad que tiene un agua en un momento dado, para disolver una cierta cantidad de carbonato.

Para la determinación cuantitativa de la agresividad potencial de las aguas cársicas, se ha utilizado tradicionalmente el denominado diagrama de Tillmans-Trombe o la versión modificada por Roques. (8)

Para la determinación cuantitativa de la agresividad en condiciones de sistema cerrado, se ha empleado el diagrama de Tillmans-Trombe modificado por Schmit. Este método gráfico se utilizó para clasificar la región de Piryny, en Bulgaria. (9) También se midió la agresividad potencial según establece el método de Hayers (Markowicz y Pulina (10)). En el mismo, cierta cantidad de mármol o roca carbonatada de la región objeto de estudio es dejada en contacto con las aguas de los arroyos de esa zona, dentro de recipientes (en los mismos sitios de estudio) a la temperatura de esas aguas. Al cabo de cierto tiempo se mide la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  disuelto.

El proceso de disolución en sistema abierto o intermedio y entre sistema abierto o cerrado respecto al  $\text{CO}_2$ , tal como ocurre en la naturaleza es menos conocido, por la variabilidad de los elementos químico-físicos que intervienen en el camino que sigue un agua cársica durante su trayectoria.

Las observaciones realizadas por Pulina en Siberia y los experimentos llevados a cabo en la Universidad de Irkutsk (11), basados en mediciones de la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  disuelto por las aguas en su infiltración vertical, pusieron de manifiesto que esta magnitud era prácticamente perpendicular a la curva de saturación en el diagrama de Tillmans-Trombe. Resultados similares fueron encontrados en los Sudetes, Tatras y Vercour. (12)

Basado en este comportamiento, observado en un gran número de mediciones en diferentes regiones, se propuso el desarrollo de experimentos de laboratorio en condiciones de sistema abierto. Roques (13) y Markowicz (14) propusieron los cálculos teóricos en estas condiciones y posteriormente Muxart (15,16) trabajó en las condiciones experimentales, proponiendo un nuevo método gráfico para determinar la agresividad del agua. El mismo se basa en relaciones de tipo lineal, mediante papel semilogarítmico entre el pH y el  $\text{CaCO}_3$  (ver Figura 2) y mediante papel doble logarítmico entre  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CaCO}_3$ . A pesar de las ventajas que presenta este método, los resultados obtenidos no reflejan con toda precisión el proceso de disolución de los carbonatos.

Otra vía alternativa para evaluar la capacidad de disolución de los carbonatos por las aguas naturales, ha sido el empleo de los denominados índices de saturación. Roques (8) propuso:

$$pH = pH_m - pH_3 \quad (1)$$

donde:

$pH$  = Diferencia entre el pH medido en el agua ( $pH_m$ ) y el pH en equilibrio ( $pH_3$ )

Al aplicar el sistema de equilibrio de los carbonatos, Roques llegó a la expresión:

$$pH = pH_m - \log K_0 + \log K_2 + \log (C_a^{2+}) + \log (HCO_3^-) + \log \frac{(1 - K_5)}{SO_4^{2-}} + C \quad (2)$$

donde:

$C$  = Magnitud que expresa la influencia de los pares iónicos  $MgHCO_3^+$ ,  $MgCO_3^*$ ,  $CaHCO_3^+$  y  $CaCO_3^*$ . Roques encontró que  $C = 0,051\ 526\ (\text{MMg}^{2+})\ 0,505\ 662$ .

$K_0$ ,  $K_1$  y  $K_5$  = Constantes de equilibrio

Si  $pH > 0$ ,  $pH_m > pH_3$  y la solución se encuentra saturada.

Si  $pH < 0$ ,  $pH_m < pH_3$  y la solución se encuentra insaturada, tendiendo a disolver más carbonato.

La magnitud pH tiene la misma significación que el índice de saturación definido por Back *et al.* (17), los cuales son los siguientes:

$$RSC = \log \frac{(Ca^{2+})(CO_3^{2-})}{K_0}$$

$$RSD = \log \frac{(Ca^{2+})(Mg^{2+})(CO_3^{2-})_2}{K_d}$$

$$RSY = \log \frac{(Ca^{2+})(SO_4^{2-})}{K_y}$$

donde:

RSC = Relación de saturación de la calcita

RSD = Relación de saturación de la dolomita

RSY = Relación de saturación del yeso

$K_d$  y  $K_y$  = Constantes del producto de solubilidad de la dolomita y el yeso respectivamente

En forma general, estos índices (ecuaciones 3,4 y 5) se les expresan mediante la expresión:

$$SI = \log \frac{KIAP}{K_{eq}}$$

donde:

SI = Índice de solubilidad

KIAP = Producto de actividad iónica

$K_{eq}$  = Constante termodinámica de equilibrio del mineral

Con el objetivo de facilitar los cálculos, los índices de E así como las incógnitas del sistema de equilibrios químicos se resuelven mediante la implementación de métodos de comparación. (18,19-21) Los resultados de este tratamiento se han expresado gráficamente en función de la dureza y de la conductividad eléctrica (Figura 3). Mediante nuevos algoritmos de computación, también es posible calcular el grado de agresividad de un agua basados en los modelos de Tillmans-Trombe y de Back, así como correlacionarlos gráficamente en función del tiempo,  $\text{CO}_2$ , pH, RSC, RSD, RSY, reza, TSS y conductividad eléctrica. (22) En la Figura 4 se muestran algunas de estas representaciones.

Se ha demostrado recientemente (23,24), que existe una correlación matemática y no son apreciables las diferencias entre los índices RSC y pH (ver Tabla 1). A partir de las ecuaciones de los sistemas de equilibrios de los carbonatos, fueron deducidas expresiones numéricas de pH y log  $p\ \text{CO}_2$  en función de la conductividad eléctrica de las aguas cársicas (25), las cuales permiten controlar el contenido de  $\text{CO}_2$  disuelto y el valor del pH medidos con conductímetros de campo (Figuras 5 y 6).

TABLA 1

Valores del índice de Tillmans-Trombe (ITT) y del RSC calculados por computación (22), en aguas cársicas durante la expedición Guaso'88 (24)

| No | Muestra                         | ITT   | RSC   |
|----|---------------------------------|-------|-------|
| 1  | Río Guaso (17/1/88)             | 0,22  | 0,25  |
| 2  | Río Guaso (26/1/88)             | -0,30 | -0,23 |
| 3  | Sumidero del río Guaso (1/2/88) | 0,39  | 0,45  |
| 4  | Hoyo Julián (1/2/88)            | 0,27  | 0,29  |
| 5  | Cueva Campanario (29/1/88)      | 0,20  | 0,19  |
| 6  | Manantial Paula (15/1/88)       | -0,27 | -0,24 |
| 7  | Manantial M. Pérez (9/2/88)     | -0,03 | -0,04 |
| 8  | Manantial Mal Paso (23/1/88)    | -0,21 | -0,15 |
| 9  | Manantial Bataldó (19/1/88)     | -0,13 | -0,08 |
| 10 | Manantial Bataldó (7/2/88)      | -0,29 | -0,28 |

La mayoría de los especialistas de los países occidentales han utilizado el método de Back para medir la capacidad de las aguas para disolver los carbonatos. Según Ford (26), en Estados Unidos y Canadá los investigadores han hecho sus cálculos en el algoritmo elaborado por Wigley.

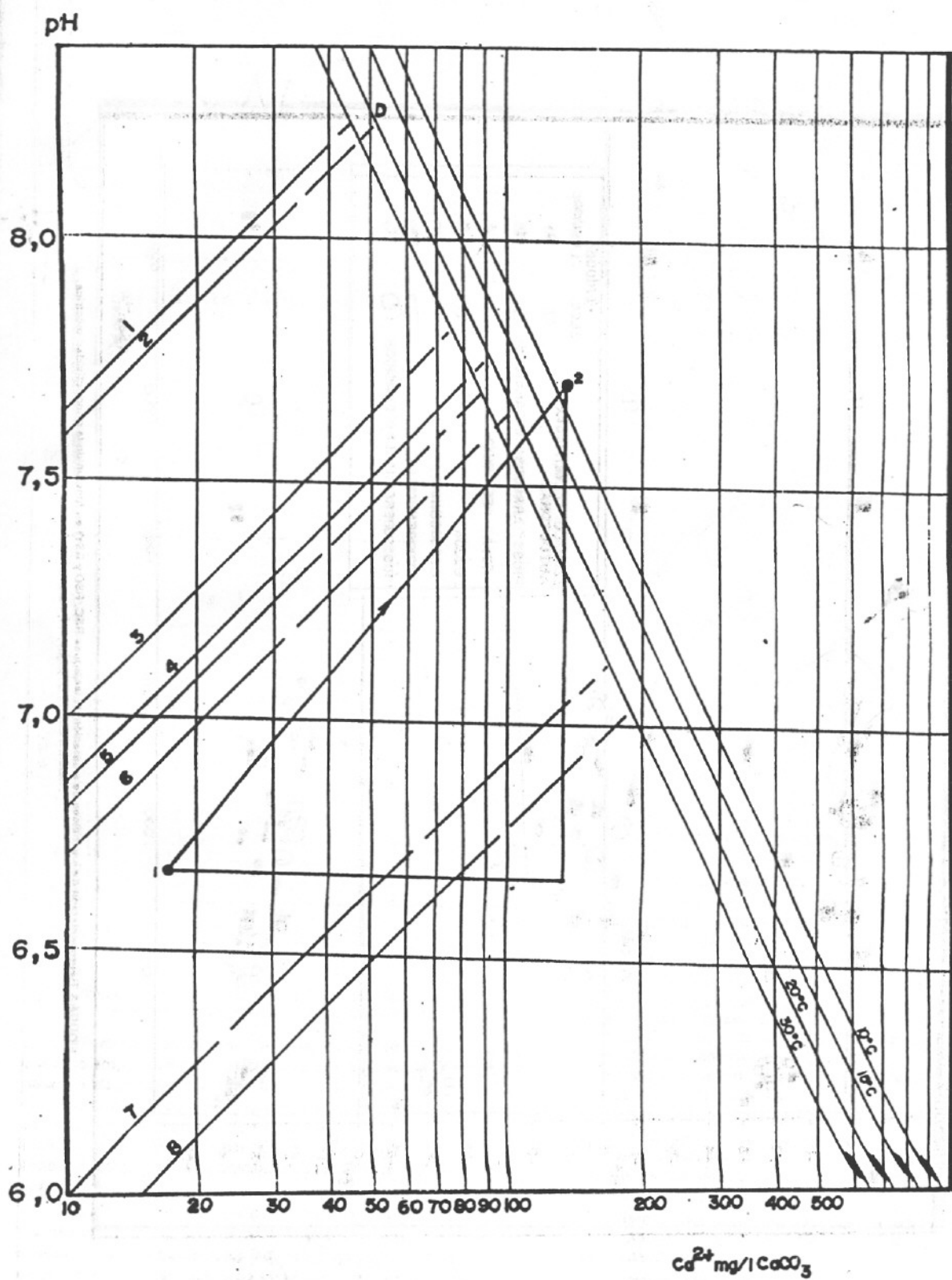


FIGURA 2. Diagrama de Muxart pH en función de  $\text{CaCO}_3$ . (15)

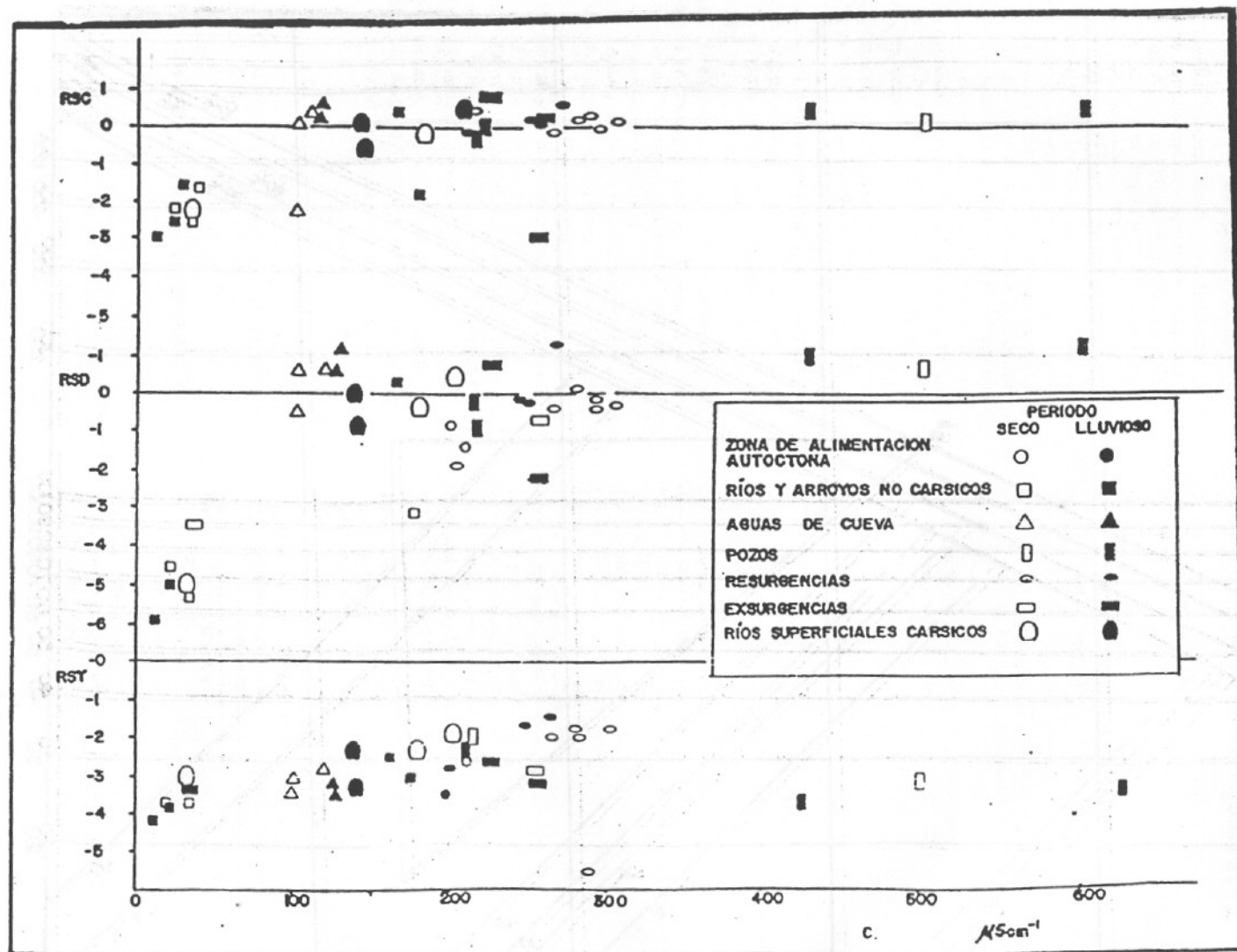


FIGURA 3. Representación de los índices de saturación de las aguas RSC, RSD y RSY) en función de la conductividad eléctrica: cuenca del río Cuyaguateje, Pinar del Río.



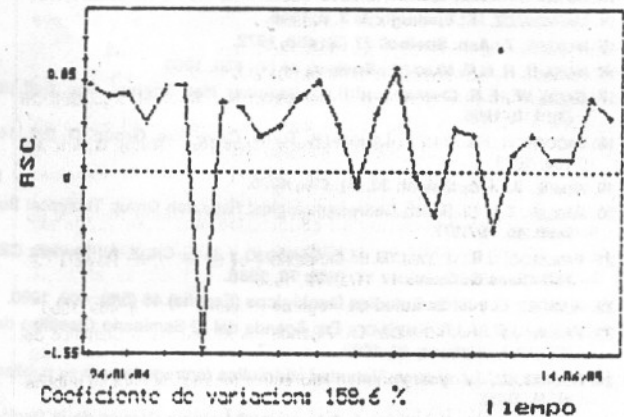
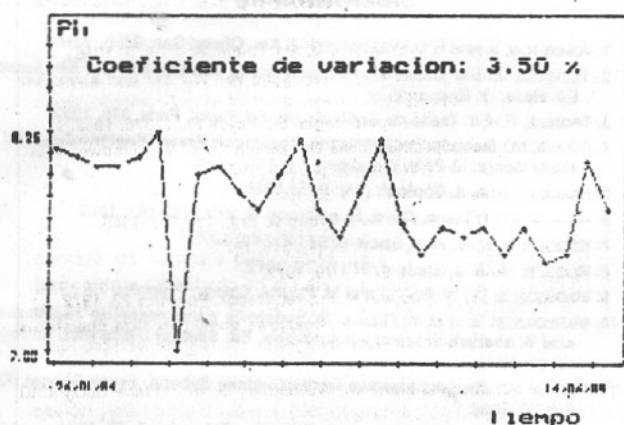
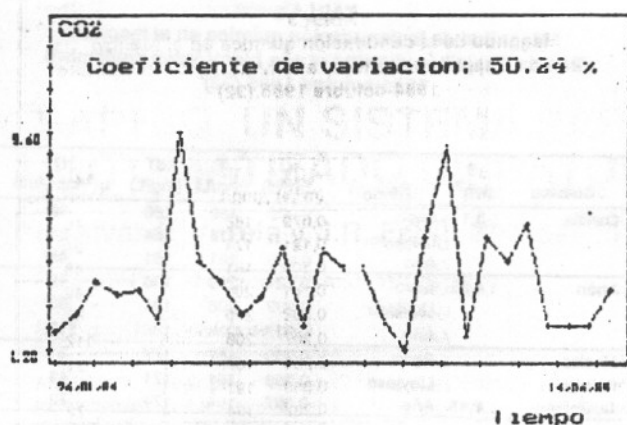


FIGURA 4. Variación del  $\text{CO}_2$  y el pH determinados en el campo; así como del RSC, calculado por computación. (22)

Ford ha destacado que los métodos gráficos son desconocidos o no empleados por los científicos de los países occidentales, a pesar de las ventajas que ofrecen los mismos para evaluar en forma rápida la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  que se disuelve o deposita a lo largo de la trayectoria de una corriente cársica, así como para estimar la evolución del pH de las aguas. Esta ventaja sobre los métodos basados en los índices de saturación de Back, también se ha resaltado por Bakalowicz. (27)

En Europa la mayoría de los carsólogos prefieren emplear los métodos gráficos, aunque también se han utilizado los computarizados, los cuales calculan los índices de saturación de la calcita, la dolomita, el yeso, así como de otros minerales en un intervalo de dureza mayor que el previsto en los experimentos que sirvieron de base a los métodos gráficos.

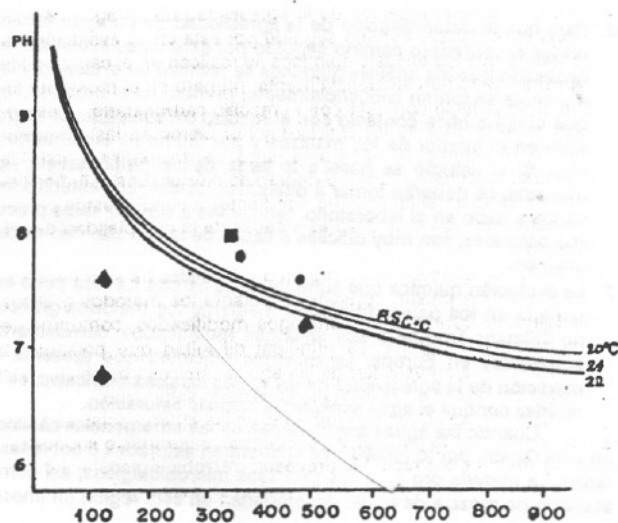


FIGURA 5. Diagrama de pH en función de la conductividad eléctrica. (25)

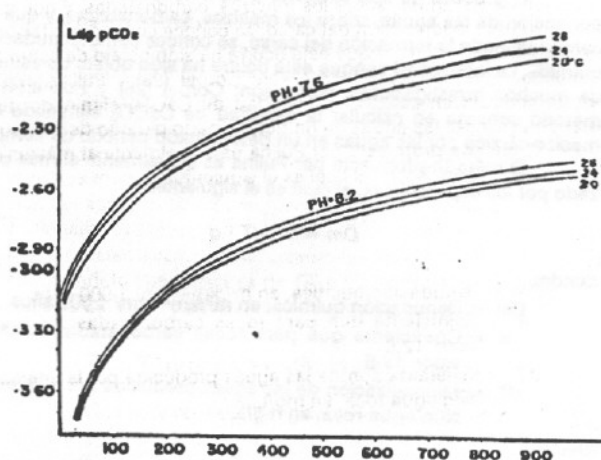


FIGURA 6. Diagrama de  $p\text{CO}_2$  en función de la conductividad eléctrica. (25)

En relación con los distintos métodos propuestos para medir el grado de agresividad de un agua, así como algunos aspectos relacionados con la misma, se puede señalar lo siguiente:

1. A pesar de las facilidades que ofrecen los métodos actuales basados en índices calculados por computación, los mismos sólo reportan cifras abstractas que tienen valor relativo, pero que no reflejan la cantidad exacta de  $\text{CaCO}_3$  disuelto o precipitado, ni el proceso a lo largo de la trayectoria del agua.
2. El cálculo de la agresividad en los restantes 3 métodos se basan en el diagrama de Tillmans-Trombe modificado. De los trabajos efectuados en los laboratorios para simular el proceso de disolución de los carbonatos, los llevados a cabo por Muxart se acercan más a las condiciones en que estos ocurren en la naturaleza. Estos trabajos han hecho posible una corrección más precisa de los diagramas de saturación.
3. Los resultados obtenidos empíricamente, mediante un número elevado de mediciones en diferentes regiones de clima templado, demuestran que las aguas en su camino de evolución, tienden a seguir una dirección perpendicular a las curvas de saturación.
4. La determinación cualitativa de la agresividad no ofrece dificultades apreciables, tanto mediante los métodos gráficos como los computarizados.
5. Las mayores diferencias entre los distintos métodos se obtienen en aguas muy agresivas (con poca mineralización y bajo pH) y las mínimas se obtienen en aguas altamente mineralizadas y de elevada dureza.

6. Para que la determinación de la agresividad de un agua cársica refleje el verdadero camino seguido por ésta en su evolución, es necesario que los análisis químicos se realicen en el campo y las muestras se tomen secuencialmente, primero en el momento en que el agua hace contacto con el macizo carbonatado, si es posible en el interior de los macizos y por último en las emergencias. Si el estudio se hace a lo largo de un perfil vertical, las muestras se deberán tomar a diferentes niveles. Los estudios llevados a cabo en el laboratorio, tendientes a simular estos procesos naturales, son muy difíciles a causa de la complejidad de los mismos.

7. La evolución química que sufre un agua cársica ha sido poco estudiada en los países tropicales mediante los métodos gráficos de Tillmans-Trombe o sus análogos modificados, comúnmente empleados en Europa. La principal dificultad que presenta la medición de la agresividad de las aguas cársicas tropicales, es la rapidez con que el agua evoluciona hacia la saturación.

Cuando las aguas son tomadas en las emergencias cársicas en esta región, por lo general, se encuentran saturadas o sobresaturadas. La materia orgánica, los procesos microbiológicos, así como el efecto de mezcla de agua, desempeñan en esta región un importante papel.

### Intensidad de la denudación química (ecuación 7)

El proceso de tipo exógeno o de intemperismo, que ocurre por acción de las aguas, sobre los macizos, carbonatados, y que da como resultado la formación del carso, se conoce como denudación química. La intensidad con que esta ocurre ha sido objeto de estudio de muchos investigadores, como son: Corbel (28) y Pulina. (4) El método consiste en calcular la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  eliminado del macizo cársico por las aguas en un determinado período de tiempo.

El método propuesto por Pulina es actualmente el más utilizado por los especialistas, el cual es el siguiente:

$$Dm = a \cdot dT \cdot q \quad (7)$$

donde:

$Dm$  = Denudación química, en  $\text{m}^3/\text{km}^2 \text{ mm} / 1\,000 \text{ años}$

$a$  = Coeficiente que para rocas carbonatadas toma el valor 12,6

$dT$  = Mineralización de las aguas producida por la interacción agua-roca, en  $\text{mg/L}$ ,

siendo:

$$dT = T - T_a$$

donde:

$T$  = Mineralización de las aguas en las emergencias

$T_a$  = Mineralización de las aguas de las precipitaciones

$q$  = Módulo de escurrimiento, en  $\text{L/s}$ ,

siendo:

$$q = 1\,000 \cdot \frac{Q}{S}$$

$Q$  = Caudal o gasto de la emergencia, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$S$  = Área de la cuenca de captación, en  $\text{km}^2$

El empleo de este método (ecuación 7) u otros similares, ha permitido medir en forma cuantitativa la intensidad de los procesos de denudación química en diferentes regiones cársicas (4,29-33) tal como se puede apreciar en las Tablas 2 y 3.

TABLA 2

Magnitud de la denudación química en el glaciar Werenskiöld determinada por Pulina et al. (4) en el año hidrológico polar comprendido entre el otoño de 1987 y el verano de 1980

| Estación                        | Intervalo   | Número | Q     | T     | dT    | D    |
|---------------------------------|-------------|--------|-------|-------|-------|------|
| Otoño 1979                      | 28/08-25/11 | 91     | 1,70  | 106,9 | 89,4  | 10,9 |
| Invierno 79/80                  | 26/11-20/05 | 178    | 0,05  | 175,5 | 157,5 | 2,0  |
| Primavera 1980                  | 21/05-22/07 | 63     | 5,60  | 61,6  | 44,1  | 12,3 |
| Verano 1980                     | 23/07-03/09 | 43     | 10,30 | 47,8  | 30,1  | 10,0 |
| Año hidrológico polar 1989-1980 | 28/08-03/09 | 373    | 2,50  |       | 35,8  |      |

TABLA 3  
Magnitud de la denudación química en el macizo Pan de Guajalón durante el año hidrológico noviembre 1984-octubre 1985. (32)

| Sistema  | S ( $\text{km}^2$ ) | Período  | Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | T ( $\text{mg/L}$ ) | dT ( $\text{mg/L}$ ) | D ( $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ ) |
|----------|---------------------|----------|-----------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Canilla  | 5,1                 | Seco     | 0,079                       | 186                 | 166                  | 16  |
|          |                     | Lluvioso | 0,121                       | 174                 | 154                  | 24  |
|          |                     | Año      | 0,100                       | 181                 | 161                  | 48  |
| Anón     | 4,35                | Seco     | 0,181                       | 208                 | 186                  | 49  |
|          |                     | Lluvioso | 0,232                       | 206                 | 186                  | 63  |
|          |                     | Año      | 0,207                       | 206                 | 186                  | 112                                       |
| Macizo   |                     | Seco     | 0,260                       | 187                 | 177                  | 31  |
| Pan de   |                     | Lluvioso | 0,353                       | 191                 | 171                  | 41  |
| Guajalón | 9,45                | Año      | 0,307                       | 194                 | 174                  | 72  |

### BIBLIOGRAFIA

1. JOHNSTON, J. and E.D. WILLIAMSON: J. Am. Chem. Soc. 38, 5, 1916.
2. TILLMANS, J.: Die Chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser. Ed. Halle, W. Knapp, 1932.
3. TROMBE, F.: En: Traité de Spéléologie. Ed. Payot, Paris, 376, 1952.
4. PULINA, M.: Denudacja Chemiczna Obzarach Krasu Weglanowego. Ed. Prace Geogr. IG PAN, Warszawa, pp. 159, 1974.
5. ROQUES, H.: Ann. Speleol. (14): 9-22, 1959.
6. ———: In: Trans. Cave. Res. Group G. Brit., 139-163, 1969.
7. ROQUES, H. et al.: Ann. Speleol. 24 (4): 549, 1973.
8. ROQUES, H.: Ann. Speleol. 27 (1): 79, 1972.
9. MARLOWICZ, M., W. POPOV and M. PULINA: Geogr. Polonica 23, 1972.
10. MARLOWICZ, M. and M. PULINA: In: Ilosciowa pomikroanaliza chemiczna wod w obzarach krasu welanowego. Ed. Silesian Universitet, Katowice, 67, 1979.
11. PULINA, M.: Zjawiska krasowe we Wschodniej Syberii, Prace Geogra. IG PAN 70, 1968.
12. PULINA, M.: Studia Geomorphol. Carpatho-Balcanica 5, 79, 1971.
13. ROQUES, H.: Ann. Speleol. 19 (2): 255, 1964.
14. MARKOWICZ, M.: Speleologia 3, 2, 1968.
15. MUXART, T.: Ann. Speleol. 27 (3): 485, 1972.
16. MUXART, R. et T. MUXART: Speleol. 24 (4): 639, 1969.
17. BACK, W., E.N. CHERRY and B.B. HANSHAW: Nat. Speleol. Soc. Bull. 28 (3): 119, 1966.
18. JACOBSON, R.L. and D. LANGMUIR: Trans. Cave Res. Group. G. Brit. 14, 104, 1975.
19. KEMPE, S.: Ann. Speleol. 30, (4): 699, 1975.
20. WIGLEY, T.M.L.: British Geomorphological Research Group Technical Bulletin 20, 46, 1977.
21. FAGUNDO, J.R., J. VALDES, M.E. CARDOSO y de La CRUZ, A.: Revista CENIC Ciencias Químicas 17, (1/2): 72, 1986.
22. ALVAREZ, E. y otros: Estudios Geológicos (España) 46 (5/6): 409, 1990.
23. PAJON, J.M. y J.R. FAGUNDO: En: Agenda del XI Seminario Científico del CENIC, La Habana, 12, 1988.
24. RODRIGUEZ, J.J. y otros: Voluntad Hidráulica (entregada para su publicación), 1990.
25. SAURO, U. and M. MENEGHEL: In: Coloquio Int. sobre Hidrología Cársica de la Región del Caribe, La Habana, 496-509, 1982.
26. FORD, D.C. Annale de la Société Géologique de Belgique 8, 283, 1985.
27. BAKALOWICZ, M.: En: "Contribution de la Géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification", These D. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 269, 1979.
28. CORBEL, J.: J. Ann. Geogr. 68, 97, 1959.
29. SAURO, U. and M. MENEGHEL: In: 9th Int. Congress on Espeleology, Barcelona 1986, Vol 1, 35-35, 1986.
30. PULINA, M. y otros: "The Dynamics of Contemporary Karst Processes in the Tropical Area of Cuba". Preliminary report of the field investigations performed by the Expedition GUAJAIBON'84 in the winter season 1984, Ed. Univ. Slaski. Sosnowice, 42, 1984.
31. FAGUNDO, J.R. y otros: Voluntad Hidráulica 70/71, 11, 1986.
32. RODRIGUEZ, J.J. y otros: En: Hidrología cársica del macizo del Pan de Guajalón. Sierra del Rosario, Pinar del Río. Año hidrológico noviembre de 1984-octubre de 1985, Ed. Academia, La Habana, 160, 1989.
33. PULINA, M., J. PERYEMA, J. KIDA and W. KRAWCZYK: Polar Research 5 (3/4): 165, 1984.