

ADOLFO ERASO*

DIAGRAMA PARA EL CALCULO DE LA ABLACION GLACIAR Y FORMACION DE HIELO EN LAS CAVERNAS GLACIARES

DIAGRAM FOR THE CALCULATION OF GLACIER ABLATION AND ICE FORMATION IN GLACIER CAVES

ABSTRACT

In the present work, we investigate the air circulation in intra and subglacial caves, we describe the existing thermodynamic conditions and we analyze the different cases which can appear in the nature as well as their morphological repercussions.

We describe and develop an enthalpy-entropy diagramme which allow us to calculate both the glacier internal ablation and in its case, the new ice formation and the temperature drops which occurred during the process. We include two representative examples: in the ALFRED WEGENER glacier investigated during the "GROENLANDIA '90" expedition, and in the GRISE FIORD (ELLESMERE) glacier investigated during the "NORTE MAGNETICO '91" expedition.

The quantitative calculation of the glacier internal ablation is a useful contribution to the knowledge of the polar shells mass balance, tightly related to the global changes.

RIASSUNTO

Questo articolo analizza le caratteristiche della circolazione dell'aria nelle cavità glaciali e descrive le condizioni termodinamiche che hanno ripercussioni sulla morfologia dei vani.

La circolazione d'aria può generarsi per cause barometriche (variazioni di pressione esterno-interno) e per cause termiche (differenza di temperatura interno-esterno con uno o più ingressi). L'incidenza di queste situazioni nella genesi di cavità glaciali è minima nel caso di differenze barometriche o di differenze di temperatura nel caso di cavità con un ingresso solo, è notevole nel caso della circolazione per differenza termica in cavità a più ingressi.

Infatti quando temperatura esterna ed interna sono diverse si genera un flusso d'aria che origina modifiche alle caratteristiche dei vani legate al mescolarsi di masse d'aria a differenti caratteristiche termodinamiche.

Se si considera che nel caso delle cavità glaciali l'umidità relativa è prossima o uguale al 100% e che la temperatura è vicina o uguale a 0°C, si comprende come l'innescarsi di processi termici comporti interessanti sviluppi morfologici. Le varianti termiche sono 8 (vedi la Tavola 5) ma di esse solamente 5 si verificano in natura.

* Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politecnica de Madrid

Quando si descrivono le fenomenologie e le morfologie legate alle grotte glaciali è opportuno quindi tenere presente che:

- la saturazione in vapor d'acqua dell'aria interna alla cavità comporta una relativamente notevole inerzia termica ed un "effetto refrigerante" sull'aria, di solito più secca, che penetra dall'esterno dando il via a fenomenologie endotermiche che generano vari morfotipi.

- la circolazione si instaura quando la temperatura interna è diversa da quella esterna: i fenomeni termici conseguenti al mescolamento si manifestano nei pressi delle bocche d'entrata.

Se la temperatura esterna è maggiore di 0°C essi si concentrano nei pressi dell'entrata superiore, se la temperatura esterna è inferiore a 0°C essi interessano l'ambito dell'entrata inferiore.

Se il contenuto calorico esterno è inferiore a quello interno il raffreddamento dell'aria interna causa la genesi di nuovo ghiaccio nella cavità (cristalli di sublimazione); se il contenuto calorico esterno è maggiore di quello interno la mescolanza porta a fusione di ghiaccio con formazione di scallops e pendenti oltre che di acqua di ablazione interna.

L'analisi delle caratteristiche di grotte in due ghiacciai polari (isola di Ellesmere e penisola Alfred Wegener) consente di quantificare, ad esempio, che:

- la miscela di aria esterna secca e aria interna umida con 1°C di differenza provoca notevoli abbassamenti di temperatura dell'aria interna (maggiori di 4° nel caso del ghiacciaio di Ellesmere), dando origine a cristalli di sublimazione.

- se aria esterna ed aria interna hanno ugual umidità ma diversa temperatura, l'aria più calda che penetra nel ghiacciaio è in grado di sciogliere notevoli quantità d'acqua dalle pareti (circa 14 gr per metro cubo d'aria nel caso del ghiacciaio Alfred Wegener).

KEY WORDS:

Glacier internal ablation, air circulation, endothermics, heat transference, enthalpy, entropy, glacier caves.

Circulation del aire en conductos glaciares

De una manera semejante a las cavernas existentes en otros materiales (caliza, yeso, etc...), las cavidades desarrolladas en el hielo glacial presentan características comunes a efectos de microclima subterráneo.

Dentro de este dominio, cobra especial interés la existencia de corriente de aire dentro de las cavernas glaciares, como consecuencia de la cual tienen lugar mezclas de aires distintos, del exterior y del interior de la caverna.

Cuando esta circunstancia se presenta, tienen lugar cambios térmicos importantes cuya consecuencia, según vamos a desarrollar en este documento, es capaz de provocar tanto una fusión adicional en el hielo de la caverna, como la formación de cristales de hielo, capaces de generar bellísimas concreciones en determinados casos.

1. CUANDO TIENE LUGAR LA CIRCULACION DE AIRE EN LAS CAVERNAS:

Tres son las situaciones que pueden generar circulación de aire en los conductos kársticos:

- a. - La barorrespiración,
- b. - La termocirculación en saco de aire,
- c. - La termocirculación en tubo de viento.

1.1. La barorrespiración se presenta en cavidades con una única entrada, cuya sección es de reducidas dimensiones, con respecto al volumen de la cavidad que deberá ser necesariamente grande (ver figura 1.1.). El motor aquí lo representan las variaciones rápidas de presión en el aire exterior. Cuando está disminuye, sale aire de la caverna y viceversa en el caso contrario.

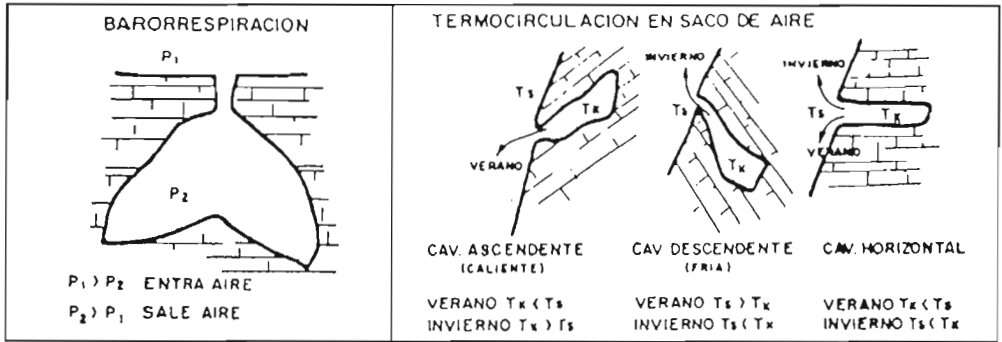


Fig. 1.1

Fig. 1.2

1.2. La termocirculación en saco de aire se presenta en cavidades con una sola boca al exterior y con una disposición topográfica dominante en un sólo sentido, caverna ascendente, descendente o caverna horizontal. El motor aquí lo representa la diferencia de temperaturas entre el aire de la cavidad T_K y el aire exterior T_S . Si tenemos en cuenta que el aire es tanto menos denso cuanto mayor es su temperatura, ocurrirá lo siguiente: (ver figura 1.2.).

☼ en verano, es decir cuando el aire exterior sea más caliente que el interior:

$$T_S > T_K$$

- las cavidades ascendentes se vaciarán del aire más frío interior que será reemplazado por aire más caliente exterior,
- las cavidades descendentes retendrán en su interior el aire más frío sin que exista renovación.

☼ en invierno, es decir cuando el aire interior sea más caliente que el exterior:

$$T_S < T_K$$

- las cavidades ascendentes retendrán en su interior el aire más caliente, sin que exista renovación,
- las cavidades descendentes se vaciarán del aire de su interior, menos denso y más caliente, que será reemplazado por aire más frío procedente del exterior,
- las cavidades horizontales, funcionan como un caso intermedio, en un comportamiento entre las ascendentes y descendentes descritas.

La incidencia de las dos situaciones, **barorrespiración** y **termocirculación en saco de aire**, descritas hasta ahora, tienen en realidad una importancia pequeña:

☼ la **barorrespiración** es bastante rara en la naturaleza, y de los escasos ejemplos con importancia real, ninguno ha sido descrito en cavidades glaciares,

☼ la **termocirculación en saco de aire**, es por el contrario muy frecuente en la naturaleza. Sin embargo, como la cantidad de volumen de aire intercambiado es pequeña y esporádica, su importancia y repercusión también lo es en grado ínfimo.

Desde el punto de vista concreto de las cavernas glaciares, los fenómenos de transferencia de calor y cambios de estado generados tienen también muy poca importancia en los dos casos descritos.

Por el contrario, la tercera situación derivada de la circulación en tubo de viento,

presenta una incidencia muy importante, tanto desde el punto de vista termodinámico, como desde el punto de vista práctico. Efectivamente, esta situación es capaz de provocar el intercambio de grandes masas de aire al provocar flujos de aire intensos y continuos, cuyo detalle vamos a desarrollar:

1.3. La termocirculación en tubo de viento se presenta en cavidades, generalmente de gran desarrollo en longitud de galerías, que poseen dos o mas bocas que comunican con el exterior, situadas (al menos dos de ellas) a diferencias de cota importante. El motor es aquí, también, la diferencia de temperaturas entre el aire del interior T_K y el aire exterior T_S . Sin embargo, la existencia de al menos dos comunicaciones con el exterior a diferente altitud, permite que se establezcan flujos importantes de aire capaces de permanecer largos períodos de tiempo, extravasando en consecuencia grandes volúmenes de aire, entre el interior y el exterior de la cavidad. Aquí precisamente radica la importancia del fenómeno!

Su funcionamiento es el siguiente, según puede verse en la figura 1.3.:

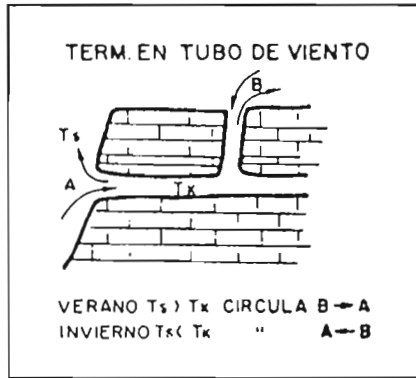


Fig. 1.3

- ⊛ en verano, cuando el aire exterior es menos denso y más caliente que el del interior $T_S > T_K$, el aire de la caverna, más denso y frío, sale por la boca inferior, provocando la entrada en la caverna de aire del exterior, a través de su boca superior. Ello genera el establecimiento de un flujo de aire desde la boca alta a la baja, que permanece mientras permanezca la diferencia de temperaturas entre ambos aires.
- ⊛ en invierno, cuando el aire del interior es mas caliente, y menos denso que el del exterior, $T_S < T_K$, el aire de la caverna sale por la boca superior, provocando la entrada en la caverna de aire mas frío y denso proveniente del exterior. Mientras este salto térmico exista, el flujo de aire descrito, permanecerá.

Esta situación descrita, generadora de flujos continuos e importantes de aire, aunque de carácter alternativo según las estaciones del año, genera la entrada de grandes masas de aire desde el exterior al interior de la caverna, por la boca alta en invierno y por la baja en verano.

Las consecuencias derivadas de la entrada de aire exterior en la caverna son de extraordinaria importancia ya que provoca la mezcla de dos masas de aire de diferentes características termodinámicas, no solamente a diferente temperatura, sino que con diferente grado de humedad, y es capaz de generar tanto la creación de nuevas masas de hielo como la fusión del hielo de las paredes del conducto, según los casos.

Su análisis detallado, lo vamos a realizar a continuación.

2. CARACTER ENDOTERMICO DE LA HUMIDIFICACION

La primera premisa de que deberemos partir es la siguiente:

- ⊛ Si mezclamos dos masas de aire de diferente grado de humedad, el más seco se humidifica a expensas del otro más húmedo, absorbiendo el sistema una cierta cantidad de calor. Si no hay aportación de calor exterior al sistema, el calor absorbido en el proceso tiene que serlo a expensas de descender su temperatura. Estos procesos que absorben calor se denominan en física **procesos endotérmicos**.

La segunda premisa a considerar la constituyen las características del aire subterráneo en las cavernas glaciares:

- ⊛ Humedad relativa ambiental del 100%, es decir a saturación,
- ⊛ Temperatura de 0°C o muy próxima.

La tercera premisa a tener en cuenta es la constancia en los valores $T_K = 0^\circ\text{C}$ y $HR_K = 100\%$ del aire subterráneo, los cuales, **permanecen constantes, incluso cuando se establecen flujos continuos e importantes de aire.**

- ⊛ Esto quiere decir que el aire subterráneo no se seca, a pesar de ceder parte de su humedad al aire exterior entrante, cuando se mezclan ambos.
- ⊛ La temperatura de 0°C del aire subterráneo viene regulado por la temperatura del hielo donde se instalan las cavernas glaciares, que es también de 0°C, en los glaciares templados (temperate) y en ciertos lugares de los glaciares subpolares.
- ⊛ La constancia del valor de la humedad del aire subterráneo, con valores de saturación ($HR = 100\%$) se atribuye a la evaporación del agua proveniente:
 - de los ríos subterráneos endo y' subglaciares,
 - del agua de percolación (seepage),
 - en menor grado, de la sublimación directa del hielo.

3. CALCULO DE ENFRIAMIENTO DEL AIRE EXTERIOR CUANDO PENETRA EN UNA CAVERNA GLACIAR. CONDICION PARA LA FORMACION DE HIELO.

Cuando el aire se humedece a expensas de la evaporación del agua, aquél absorbe una cierta cantidad de calor durante el proceso, que viene dado por:

$$Q = \varphi \cdot q_L \cdot W \quad (3.-1)$$

siendo:

Q = cantidad de calor absorbido por el sistema en Kcal/m^3

φ = la humedad relativa en tantos por uno, (Para $\varphi = 1$; $HR = 100\%$),

q_L = calor sensible de transformación en cal/gr ,

W = masa de vapor de agua saturante del aire en gr/m^3

como Q , q_L y W dependen de la temperatura T , relacionamos dichos valores en la siguiente tabla:

T temperatura en °C	q_L calor sensible de vaporización en cal/gr	W cantidad en vapor de agua saturante en gr/m ³	Q calor absorbido por el sistema en Kcal/m ³
-5	598'7	3'40	2'04
0	595'9	4'84	2'88
+5	593'2	6'79	4'03
+10	590'4	9'39	5'54

Fig. 3

o mejor en la siguiente figura 3.-1:

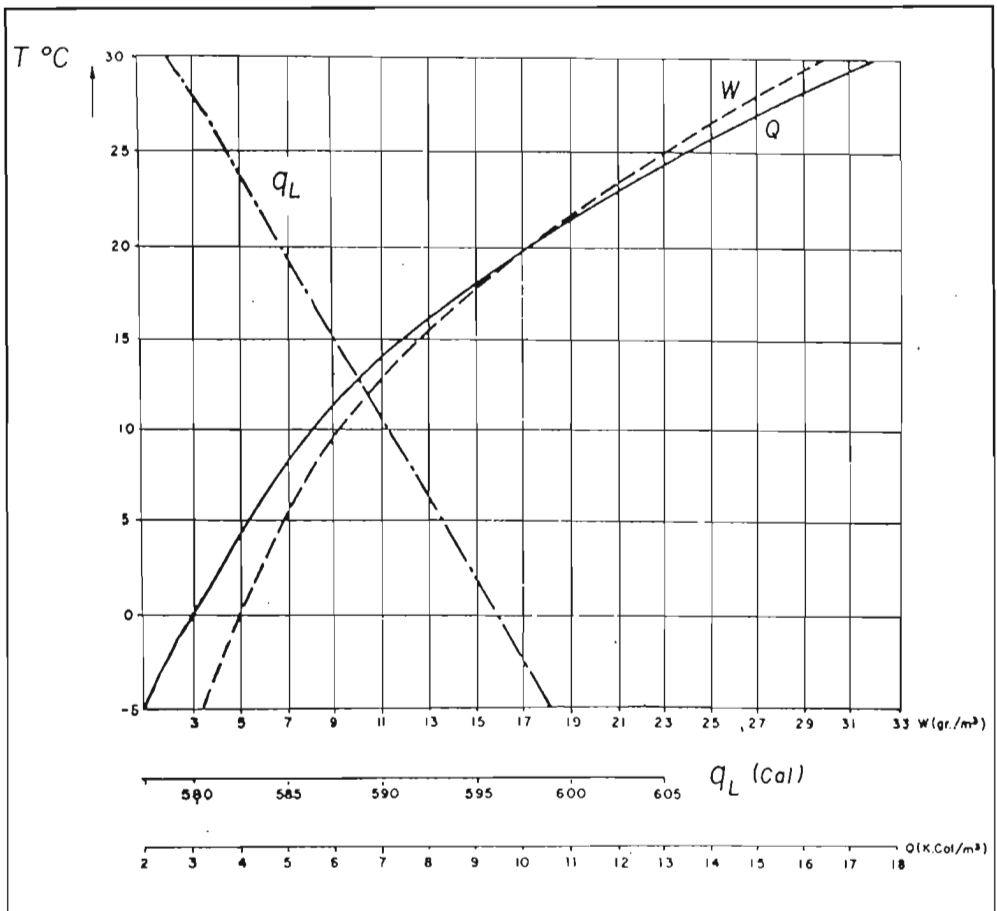


Fig. 3.1

Para conocer el descenso de temperatura que sufrirá el aire exterior al entrar en la caverna glaciar, y mezclarse con el aire interior saturado de humedad, nos bastará aplicar la siguiente expresión:

$$T_D = \frac{Q_K - Q_S}{1000 \cdot \gamma \cdot C_p} \quad (3.-2)$$

siendo:

T_D = descenso de temperatura sufrido por el aire exterior al entrar en la caverna glaciar, en °C,

Q_K = contenido calórico del aire subterráneo en Kcal/m³,

Q_S = contenido calórico del aire exterior en Kcal/m³,

γ = peso específico del aire exterior en Kgr/m³,

C_p = calor específico del aire exterior en cal/°C.gr,

y como las condiciones del aire de la caverna glaciar son: 0°C de temperatura T_K y humedad relativa **HR** del 100%, podemos calcular el valor Q_K aplicando la expresión (3.-1):

$$Q_K = q_L \cdot \varphi \cdot W$$

siendo según la figura 3.1 y la tabla 3:

$$q_L = 595'9 \text{ cal/gr para } T_K = 0^\circ\text{C,}$$

$$W = 4'84 \text{ gr/m}^3 \text{ para } T_K = 0^\circ\text{C,}$$

y:

$$\varphi = 1 \text{ para } HR = 100\%$$

quedando en definitiva:

$$Q_K = 595'9 \times 4'84 \times 1 = 2'884 \text{ Kcal/m}^3,$$

valor que expresa el contenido calórico del aire de la caverna glaciar, para las condiciones dadas.

Este valor de referencia es de suma importancia como veremos enseguida.

El aire exterior, cuyas condiciones meteorológicas de temperatura T_S y humedad relativa **HR**, varían constantemente a lo largo del tiempo, presenta en consecuencia un contenido calórico Q_S también variable.

Siempre que se de la condición:

$$Q_K > Q_S$$

Hay descenso térmico y el aire más seco y caliente que penetra en la caverna glaciar al humedecerse se enfría lo suficiente para quedar a temperatura bajo cero y formar cristales de hielo sobre sus paredes, cerca de las bocas de entrada superiores.

Para aclarar conceptos, veamos un ejemplo real:

Hemos elegido el pequeño glaciar de Grise-Fiord, al sur de la isla de Ellesmere (lat.: 76°25'N, long.: 82°45'W) donde hay una caverna glaciar con río subterráneo de más de un kilómetro de longitud, existiendo cerca de la boca de entrada un lugar denominado "La Nevera" con llamativos cristales de hielo de sublimación. Las observaciones reali-

zadas en agosto de 1991 mostraron las siguientes condiciones:

Para el aire subterráneo: $T_K = 0^\circ\text{C}$.
 $HR = 100\%$.
 Para el aire exterior: $T_S = 1^\circ\text{C}$,
 $HR = 50\%$,
 siendo la presión barométrica de 710 mm Hg.

Realizando los correspondientes cálculos, encontramos:

$$Q_K = q_L \cdot \phi \cdot W = 595'9 \times 1 \times 4'84 = 2.884 \text{ cal/m}^3,$$

$$Q_S = q_L \cdot \phi \cdot W = 595'35 \times 0'5 \times 5'19 = 1.545 \text{ cal/m}^3,$$

da donde:

$$Q_K - Q_S = 1.339 \text{ cal/m}^3$$

y como por otro lado el calor específico del aire C_p es de $0'25 \text{ cal/}^\circ\text{C.gr}$ y su peso específico γ de $1'2 \text{ Kgr/m}^3$ para la citada presión barométrica de 710 mm Hg, aplicando la expresión (3.-2) tendremos:

$$T_D = \frac{Q_K - Q_S}{1000 \cdot \gamma \cdot C_p} = \frac{2.884 - 1.545}{1000 \times 1'2 \times 0'25} = 4'46 \text{ }^\circ\text{C}$$

y:

$$T_S - T_D = 1 - 4'46 = -3'46 \text{ }^\circ\text{C}$$

lo que significa que el aire exterior que estaba a 1°C sobre cero, al entrar en la caverna y humedecerse se enfría $4'46^\circ\text{C}$ quedando a $3'46$ grados bajo cero. Esta circunstancia explica la presencia de los citados cristales de hielo de sublimación, cerca de la entrada por donde penetra.

Para facilitar todos los cálculos de descenso térmico al penetrar el aire exterior en las cavernas naturales, donde el aire subterráneo está saturado en humedad, hemos elaborado el nomograma de la figura 3.-2, que consta de cuatro gráficos acoplados cuyo significado es el siguiente:

En el gráfico 1, conociendo la temperatura T del aire en abscisas, en función de su humedad relativa HR , se halla su contenido calórico Q en ordenadas. Esto vale aquí tanto para el aire superficial entrante (T_S, Q_S), como para el aire subterráneo de la caverna (T_K, Q_K).

Cuando Q_K sea mayor que Q_S , habrá descenso térmico.

En el gráfico 2, aprovechando las propiedades de los diagramas triangulares, se traslada la diferencia $Q_K - Q_S$, desde las ordenadas del gráfico 1 descrito a las ordenadas del gráfico 4, que luego explicaremos.

En el gráfico 3, conociendo la temperatura T_S del aire en abscisas y su presión barométrica en milímetros de mercurio, se calcula su peso específico γ en ordenadas, en Kgr/m^3 . La intersección del valor de γ así encontrado, con la recta de operación $1000 C_p$, nos da el **Factor Climático** del aire exterior cuyo valor:

$$1000 \cdot \gamma \cdot C_p \quad \text{en } \text{Kgr/}^\circ\text{C.m}^3$$

representa el denominador de la expresión (3.-2) cuyas dimensiones son las de una entropía.

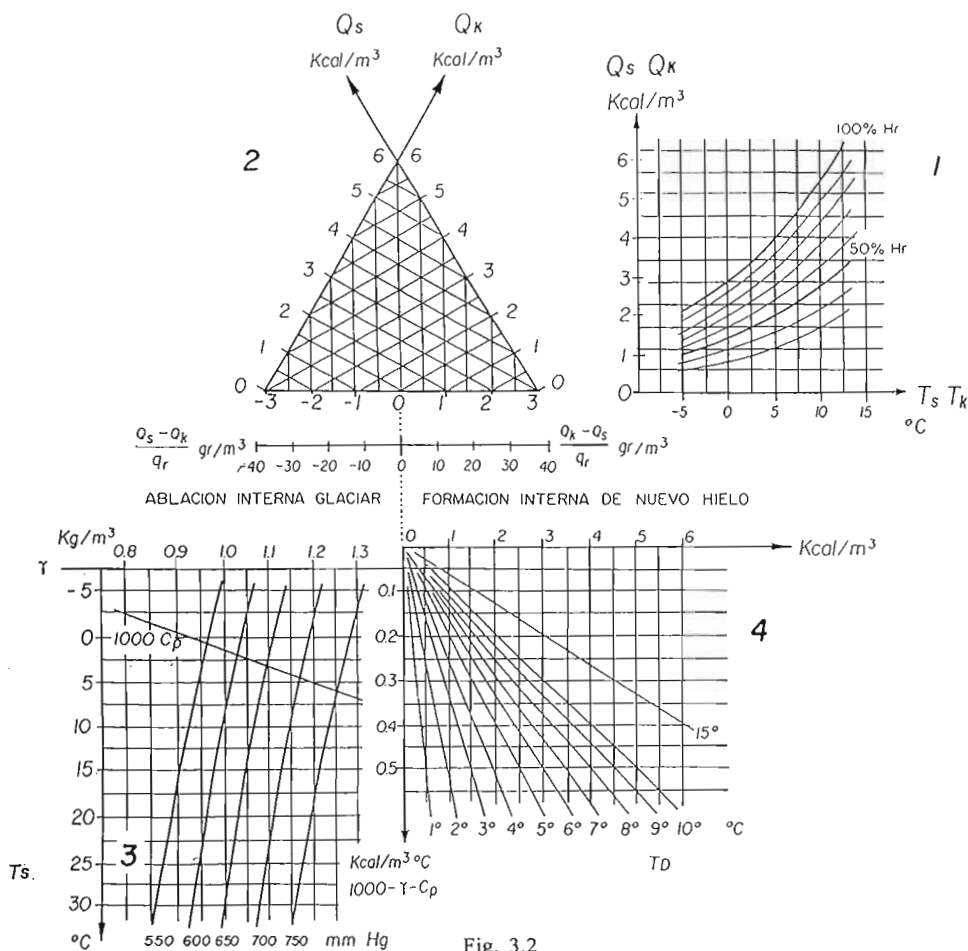


Fig. 3.2

Finalmente, en el gráfico 4, en abscisas, se representa el valor del citado factor climático $1000 \cdot \gamma \cdot C_p$ y en ordenadas la diferencia $Q_k - Q_s$ cuando esta es positiva. La intersección de ambos valores nos da directamente el descenso térmico T_d sufrido por el aire exterior al entrar en la caverna y mezclarse con el aire subterráneo saturado en humedad. De esta manera, resolvemos gráficamente la citada expresión (3.2), que era la siguiente:

$$T_d = \frac{Q_k - Q_s}{1000 \cdot \gamma \cdot C_p}$$

El nomograma descrito tiene validez para calcular los descensos térmicos sufridos por el aire exterior al entrar en cualquier enrejado kárstico o gran complejo de cavernas. Para su validación sólo se necesita la condición de que el aire del interior se halle saturado de humedad (**HR** = 100%) gracias a la presencia de ríos subterráneos y/o a los degoteos por infiltración, lo que es verdad la mayoría de las veces. Las cavernas glaciares representan un caso particular dentro del contexto descrito, ya que en ellas se cumplen

dos condiciones para el aire subterráneo:

- ⊛ La general, descrita de saturación: $HR = 100\%$.
- ⊛ La particular, mediante la cual la temperatura del aire es de 0°C : $T_K = 0$.

4. CUANDO LA ENTRADA DE AIRE EXTERIOR EN LAS CAVERNAS GLACIARES PRODUCE FUSION DEL HIELO

En el caso en que el contenido calórico del aire entrante Q_S sea mayor que el del aire subterráneo Q_K , cuyo valor de referencia para las cavernas glaciares es de 2.884 cal/m^3 , aquél (el aire entrante) aportará calor al aire de la caverna, el cual debería calentarse. Esto, sin embargo, no ocurre ya que el citado aporte de calor se invierte en fundir una parte del hielo de las paredes, conservandose para el aire subterráneo la constancia en sus características climáticas: temperatura de 0°C y humedad a saturación.

Así pues, la condición necesaria para que se provoque la fusión del hielo al penetrar aire del exterior en una caverna glaciar es que:

$$Q_S > Q_K$$

interesándonos en este caso conocer la importancia del fenómeno, ya que su estimación cuantitativa es fácil de realizar.

Efectivamente, la entrada de aire, con mayor contenido calórico, en la caverna glaciar, representa físicamente el establecimiento de un flujo de calor, que se invertirá en la fusión del hielo de las paredes del conducto glaciar.

La cantidad invertida en dicho proceso será la del excedente del contenido calórico del aire entrante Q_S con respecto al del aire de la caverna Q_K . Es decir:

$$Q_S - Q_K$$

Para conocer la cantidad de agua así formada, o la pérdida de masa de hielo que se ha fundido, basta dividir dicho valor por el **calor latente de fusión del hielo** q_r , cuyo valor es:

$$q_r = 79.7 \text{ cal/gr}$$

y recordando el valor de referencia de Q_K :

$$Q_K = 2.884 \text{ cal/m}^3,$$

podremos calcular la cantidad M de hielo fundido o de agua generada por este mecanismo, mediante la expresión:

$$M = \frac{Q_S - Q_K}{q_r} = \frac{Q_S - 2.884}{79.7} \text{ gr/m}^3 \quad (4.-1)$$

que nos dará los gramos de hielo fundido por cada metro cúbico de aire entrante.

Veamos un ejemplo real:

Al sur de la península Alfred-Wegener (lat.: $71^{\circ}05'N$; long.: $52^{\circ}W$), hay un glaciar innominado, de cuyo frente surge un río que drena al fiordo de Maarmorilik. En dicho glaciar existen varias cavernas con drenajes subterráneos y con notable circulación de aire en ellas.

Las observaciones realizadas en agosto de 1990 mostraron las siguientes condiciones:

Para el aire subterráneo: $T_K = 0^\circ\text{C}$
 $HR = 100\%$.

Para el aire exterior: $T_S = 5^\circ\text{C}$
 $HR = 100\%$

aplicando las expresiones (3.-1) y (4.-1), tendremos:

- ⊛ Contenido calórico del aire superficial:

$$Q_s = 593'2 \times 1 \times 6'79 = 4.028 \text{ cal/m}^3.$$

- ⊛ Masa de hielo fundido por el flujo de aire:

$$\frac{Q_s - 2.884}{79'7} = \frac{4.028 - 2.884}{79'7} = \frac{1.144}{79'7} = 14'35 \text{ gr/m}^3$$

es decir que cada metro cúbico de aire que penetre en el glaciar, es capaz de fundir 14'35 gramos de hielo de las paredes del conducto.

En uno de los ponores superiores explorado en parte, se observó la entrada de una fuerte corriente de aire, cuyo caudal no se midió.

Si asumimos que penetrasen dos metros cúbicos de aire por segundo, se llega fácilmente a calcular la pérdida de masa de hielo diario. Dicho valor es de 2'7 m³/día, que representa la ablación interna glaciar en las paredes del conducto por el que drena el ponor citado; debido únicamente al mecanismo del flujo entrante de aire.

El ejemplo descrito es en cierta manera un caso sencillo, pues no es frecuente que el aire exterior esté saturado de humedad.

En el caso de que el aire exterior esté mas seco, la realidad será algo más compleja, ocurriendo lo siguiente:

- ⊛ al penetrar en la caverna glaciar aire más caliente y seco, este se humedecerá hasta saturación enfriándose en consecuencia.
- ⊛ durante dicho proceso, disminuirá su temperatura T_s , aumentará su humedad relativa hasta alcanzar el valor de saturación $HR = 100\%$, pero mantendrá su contenido calórico Q_s , que conocemos desde el principio.
- ⊛ Si $Q_s > Q_K$ se fundirá una cierta masa de hielo según se explicó en el párrafo 4.
- ⊛ Si $Q_s < Q_K$ alcanzará su saturación a temperatura inferior a cero grados según vimos en el párrafo 3 y se formará una cierta cantidad de hielo, cuya cuantía puede conocerse también por la expresión (4.-1).

Recordemos que dicha expresión es la misma utilizada para calcular la masa fundida de hielo.

5. SINTESIS DE LOS FENOMENOS Y MECANISMOS EXPLICADOS

La aparente complejidad de los fenómenos hasta ahora explicados para comprender el mecanismo de la circulación del aire por los conductos glaciares y las consecuencias

que de ello se derivan, se puede sintetizar mediante el establecimiento de unas pocas premisas generales:

- ⊛ La humedad relativa a saturación del aire de las cavernas glaciares imparte a dicho ambiente una gran inercia térmica, y un fuerte efecto refrigerante sobre el aire más seco cuando penetre desde el exterior.
- ⊛ La humedad relativa, en general menor que la correspondiente a saturación, del aire exterior, condiciona su humidificación al penetrar en la caverna, y en consecuencia su enfriamiento, dado el carácter endotérmico del fenómeno.
- ⊛ Los fenómenos térmicos descritos al mezclarse dos masas de aire de diferentes características tienen lugar dentro de la caverna glaciar, donde el sistema está más aislado, y se manifiestan no lejos de las bocas de entrada. Bajo este concepto, se pueden dar dos posibilidades diferentes:
 - Cuando el aire de la caverna es más caliente que el del exterior, $T_K > T_S$, este último penetra por las bocas inferiores.
 - Cuando el aire de la caverna es más frío que el del exterior, $T_S > T_K$, este último penetra por las bocas superiores.
 - Si ambas temperaturas son idénticas, $T_S = T_K$, no pasa nada, pues al ser la densidad de ambos aires idéntica, no se establece circulación alguna.
- ⊛ Como la temperatura del aire de la caverna glaciar T_K es de 0°C , podemos resumir la premisa anterior de la siguiente manera:
 - $T_S > 0$: Algunos de los fenómenos descritos ocurrirán en la caverna glaciar, cerca de las bocas de entrada superiores.
 - $T_S < 0$: Determinados fenómenos descritos ocurrirán en la caverna glaciar, cerca de las bocas de entrada inferiores.
- ⊛ Si el contenido calórico del aire exterior Q_s es menor que el de la caverna Q_K , tienen lugar, al mezclarse ambos, los fenómenos endotérmicos descritos. El enfriamiento producido por esta causa, genera la formación de nuevo hielo en la caverna que suele estar representado por cristales de sublimación de diferente hábito y ocasionalmente por banderas y estalactitas (ver ejemplo del glaciar GRISE FIORD).
- ⊛ Si el contenido calórico del aire exterior Q_s es mayor que el de la caverna Q_K , al mezclarse ambos, se produce la fusión de parte del hielo de las paredes del conducto y de los espeleotemas existentes, como consecuencia del aporte de calor desde el exterior. La consecuencia es el establecimiento de cierta ablación glaciar subterránea que se manifiesta en la aparición de huellas de corriente o "scallops" en las paredes del conducto y la formación de penitentes en los espeleotemas (ver ejemplo del glaciar ALFRED WEGENER).

En la tabla 5. se sintetizan todas estas cuestiones, existiendo ocho variantes teóricamente posibles, de las que sólo cinco ocurren en la naturaleza.

En la medida que el futuro del clima de la Tierra depende del balance de masa de los casquetes de hielo polares, la cuantificación de la ablación interna glaciar representa una aportación en dicho campo que hasta ahora no había sido considerada.

BIBLIOGRAFIA

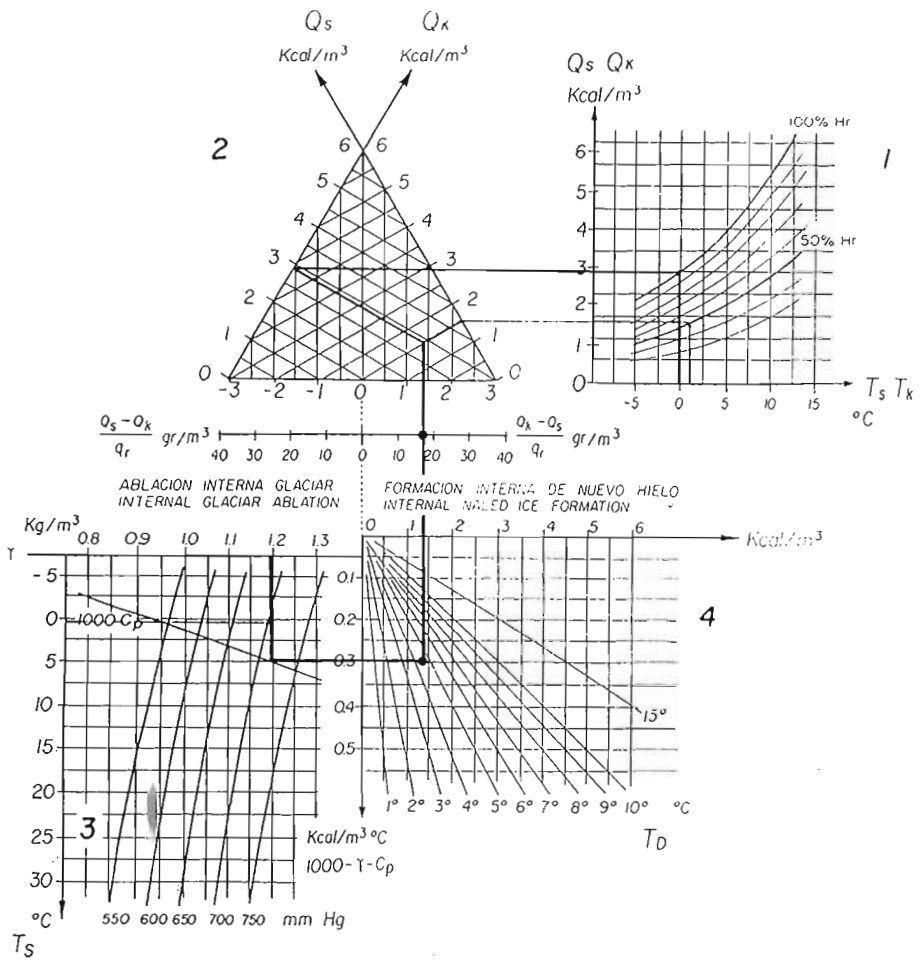
- ERASO, A., 1965 - "*Tentative nomogram of cave climate calculation*", "Problems of the speleological research", Publication of the Czechoslovak Academy of Sciences, pp. 175-186. Praga.
- ERASO, A., PULINA, M., 1992 - "*Cuevas en hielo y glaciokarst*", book in print, 85 figuras (35 figuras, 4 planos, 40 fotos blanco y negro), 25 fotos color, 180 pp, Mc Graw Hill, Madrid.
- ERASO, A., 1992 - "*The internal ablation of the glaciers by air circulation. Analysis of the problem and calculations*". Conference in Silesian University. Sosnowiec.



Glaciar de Grise Fiord. Ellesmere, Artico canadiense. Formacion de cristales de sublimacion sobre espeleotemas de hielo, por circulacion de aire. (Foto Tatuk)



Glaciar de la península de Alfred Wegener, Groenlandia. Ablacion del hielo parietal y formacion de flutes por circulacion de aire. (Foto Tatuk)

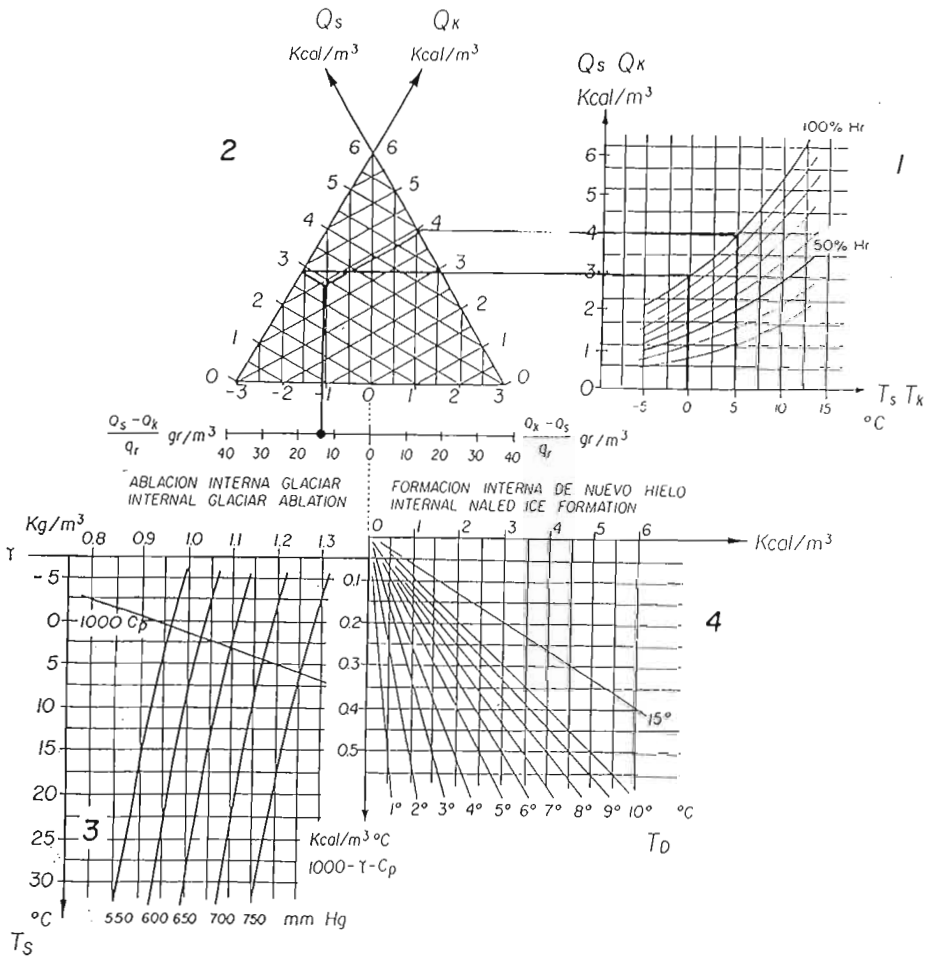


ENTHALPY - ENTROPY DIAGRAM

INTERNAL ABLATION AND NALED ICE FORMATION
 INTO THE GLACIARS BY AIR CIRCULATION

GLACIAR GRISE FIORD

ELLESMERE - CANADA



ENTHALPY - ENTROPY DIAGRAM

INTERNAL ABLATION AND NALED ICE FORMATION
 INTO THE GLACIARS BY AIR CIRCULATION

GLACIAR ALFRED WEGENER

GREENLAND

**CUANTIFICACION DE LA VARIACION DE MASA GLACIAR EN FUNCION DE LA CIRCULATION DE AIRE EN CAVERNAS INTERGLACIARES
QUANTIFICATION OF THE VARIATION IN THE GLACIER MASS AS A FUNCTION OF AIR CIRCULATION IN INTERGLACIER CAVES**

Características generales del aire de la caverna.	Características del aire exterior al penetrar en la caverna.	Variantes teóricamente posibles.	Donde ocurre el fenómeno.	Fenómeno que tiene lugar. Descripción breve del mismo.	Cuantificación del fenómeno descrito.	Consecuencias morfológicas que tienen lugar en la caverna glaciar por causa de los fenómenos descritos.		
$T_k = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ $HR = 100\%$ $Q_k = 2.864 \text{ cal/m}^3$	$T_s > 0$ $HR < 100\%$	① $Q_s > Q_k$	En las entradas superiores.	Fusión del hielo parietal. Ablación interna.	$M = \frac{Q_s - Q_k}{q_l} = M$	Formación de scallops o huellas de corriente.		
		② $Q_s < Q_k$		NO EXISTE EN LA NATURALEZA				
	$T_s > 0$ $HR < 100\%$	③ $Q_s > Q_k$	En las entradas superiores.	Ligero enfriamiento del aire entrante, quedando por encima de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Fusión del hielo parietal.	$M = \frac{Q_s - Q_k}{q_l}$ $T_0 = \frac{Q_k - Q_s}{1000 \cdot \gamma \cdot C_p}$	Formación de scallops o huellas de corriente.		
		④ $Q_s < Q_k$		Condensación parietal y formación de nuevo hielo. Enfriamiento del aire entrante por debajo de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$.			Formación de espeleotemas, banderas, estalactitas a veces inclinadas, y eventualmente, cristales parietales de hielo, de sublimación.	
	$T_s < 0$ $HR < 100\%$	NO SE PRODUCE LA ENTRADA DE AIRE EN LA CAVERNA			NO EXISTE EN LA NATURALEZA			
		⑤ $Q_s > Q_k$	NO EXISTE EN LA NATURALEZA			NO EXISTE EN LA NATURALEZA		
		⑥ $Q_s < Q_k$	En las bocas inferiores.	Formación de nuevo hielo en el techo y paredes.	$M = \frac{Q_k - Q_s}{q_l}$	Formación de cristales de hielo de sublimación.		
		⑦ $Q_s > Q_k$		NO EXISTE EN LA NATURALEZA				
		⑧ $Q_s < Q_k$	Enfriamiento adicional del aire entrante. Formación de nuevo hielo en el techo y paredes.	$T_0 = \frac{Q_k - Q_s}{1000 \cdot \gamma \cdot C_p}$ $M = \frac{Q_k - Q_s}{q_l}$	Formación de cristales de hielo, de diverso hábito, por sublimación.			

TABLA 5. Síntesis de los fenómenos descritos y su repercusión

T_k = Temperatura del aire de la caverna.
 T_s = Temperatura del aire exterior entrante.
 H_R = Humedad relativa del aire.
 Q_s = Contenido calórico del aire exterior.
 Q_k = Contenido calórico del aire interior.
 q_l = Calor latente de fusión del hielo.
 C_p = Calor específico del aire exterior.
 γ = Peso específico del aire exterior.
 T_0 = Descenso de temperatura sufrido por el aire exterior.
 M = Masa de hielo fundido o depositado.