

Esta sección es una propuesta para abordar temas de química en forma integral, buscando relacionar los tres ejes centrales sobre los que se construye la ciencia de hoy: teoría, experimento y simulación.

¿Cómo se forman los cristales?

Vicente Talanquer, Fabiola Barrios y Sergio Granados*

Abstract

The phenomenon of crystal growth is reviewed following an integral approach where theory, experiment and computer simulation are used as complementary educational tools. Basic concepts on crystal nucleation are introduced and simple experiments on crystal growth are proposed. The modeling of this complex process is simplified by designing a computer simulation where deposition of atoms on the crystal surface, migration of an adatom on the surface and desorption of an atom from the surface are the only elementary processes taken into account.

Para saber,

Hace miles de años, Homero, al escribir la Iliada y la Odisea, utilizó la palabra *krystallos* para referirse a las grandes formaciones de cristal de roca que sus héroes encontraron en el camino. En griego clásico esta palabra significa "hielo claro", y de ella se deriva el término *cristal* con el que hoy día identificamos el estado de agregación de un gran número de sustancias, entre ellas el cristal de roca o cuarzo (Narayan, 1992).

El reconocimiento de la existencia de materiales cristalinos es quizá tan antiguo como las técnicas utilizadas para obtenerlos. La formación de cristales o cristalización ha sido uno de los procesos de separación y purificación de sustancias más utilizado a lo largo de la historia de la ciencia y la tecnología humanas. En la actualidad se utilizan diversas técnicas de cristalización para separar y purificar desde fertilizantes hasta los más delicados productos farmacéuticos. De la misma manera se recurre a estos métodos para extraer o separar las miles de toneladas de sal y azúcar que se consumen en el mundo cada año (Pamplin, 1975).

Los cristales se distinguen de otros sólidos, a los que se denomina amorfos, por sus propiedades físicas particulares. Por ejemplo, algunos de ellos exhiben formas geométricas cuya simetría (cúbica, hexagonal) puede observarse a simple vista; tal es el caso de los diamantes, los copos de nieve o la sal común (figura 1). Sin embargo, hay materiales cristalinos que no comparten esta característica, como sucede con la mayoría de los metales.



Figura 1. Los depósitos de hielo sobre una ventana también presentan estructura cristalina.

La manera más segura de distinguir un sólido cristalino de sólidos amorfos, como el vidrio o los plásticos, es analizando el resultado de su interacción con un haz de luz cuya longitud de onda λ se localiza en la región de los rayos X ($\lambda \cdot 10^{-9}$ m). Cuando un haz de rayos X incide sobre un sólido cristalino se produce un patrón de difracción que lo identifica como una huella digital. La difracción de la luz da lugar a una imagen cuya estructura y simetría no sólo permite distinguir entre un cristal y un sólido amorfo (que genera patrones de difracción difusos), sino entre diversos materiales cristalinos (Atkins, 1986).

El modelo que se utiliza para tratar de dar una explicación a las propiedades de los materiales cristalinos fue sugerido por Kepler a principios del siglo XVII. Este investigador fue uno de los primeros en señalar que la forma hexagonal de los copos de nieve era seguramente el resultado del acomodo regular de las partículas que los constituyen. Con el tiempo, las características peculiares de los sólidos cristalinos se convirtieron en argumentos centrales en la defensa de la teoría corpuscular de la materia (Toulmin, 1966).

Las propiedades de los cristales pueden entenderse si se supone que están constituidos por gran cantidad de partículas que se acomodan de manera ordenada formando estructuras que se repiten una y otra vez dentro del sistema (figura 2). Estas partículas interactúan entre sí con fuerzas

*Departamento de Física y Química Teórica, Facultad de Química, UNAM, México, D.F. 04510

Correo electrónico: vicente@zenon.pquim.unam.mx

Recibido: 6 de noviembre de 1997; Aceptado: 6 de enero de 1998.

que le dan cohesión al material y determinan su geometría. Desde esta perspectiva, la simetría de los patrones de difracción de rayos X generados por un sólido cristalino es el reflejo del orden microscópico al que están sujetos sus átomos o moléculas.

Como todo estado de agregación, el estado sólido de un material sólo se presenta en intervalos de temperatura y presión determinados. El hierro metálico pierde su estructura cristalina a una temperatura de fusión de 1,535°C, mientras el mercurio la recupera a -38.5 °C. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con los líquidos o los gases, la estructura del sólido que se forma depende del proceso seguido para provocar el cambio de estado.

Cuando la temperatura de un líquido, como el hierro fundido o el agua misma, se reducen a presión constante, se alcanza una temperatura particular a la cual el líquido puede coexistir con su sólido. Sin embargo, para que el material empiece a solidificarse, se necesita reducir la temperatura más allá de su temperatura de solidificación; sólo en esas condiciones el sólido es la fase más estable y tiene la oportunidad de empezar a formarse en el seno del líquido. Este proceso de enfriamiento se representa con una flecha horizontal en el diagrama de fases de la figura 3, en el que las líneas sólidas corresponden a estados de coexistencia de dos fases (Atkins, 1986).

A las condiciones de temperatura y presión señaladas por la región sombreada en el diagrama de la figura 3, el líquido existe como fase metaestable y es ahí donde se dispara la transición de fases. El mecanismo que da lugar al cambio de estado se conoce como *nucleación*, pues en diferentes regiones de la fase fluida empiezan a formarse agregados de partículas, o núcleos, que tienen ya la estructura del sólido. Un líquido puede mantener su estado de agregación por debajo de la temperatura de solidificación porque la formación de estos núcleos no siempre es fácil (Oxtoby, 1992).

Muchos de los cúmulos de partículas que se forman durante la nucleación se deshacen en seguida. Esto sucede porque el costo energético de formar la interfase entre el sólido y el líquido que lo rodea es mayor que lo que se gana por la formación de núcleos de la fase más estable (el sólido en este caso). El cambio de energía libre ΔG_n al formar un núcleo sólido de n partículas resulta de la suma algebraica de estas dos contribuciones (Adamson, 1967):

$$\Delta G_n = \sigma_{sl} A(n) + n\Delta \mu_{sl} \quad (1)$$

El primer término en esta relación depende del área del núcleo $A(n)$ y de la tensión interfacial entre el sólido y el líquido σ_{sl} , y representa el costo de formar la nueva interfase. Por su parte, $\Delta \mu_{sl}$ es una medida de la disminución

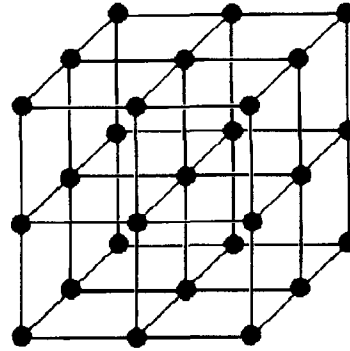


Figura 2. En sólidos iónicos como el cloruro de sodio (NaCl) los iones se distribuyen en un arreglo similar al de esta figura.

de energía libre por cada partícula que se integra a un núcleo formado por la fase más estable. Si se asume que los núcleos son esféricos, el valor de ΔG_n puede graficarse como función del número de partículas n a temperatura constante, como se muestra en la figura 4. Esta gráfica presenta un máximo asociado a la presencia de un núcleo de tamaño crítico n^* . Cualquier cúmulo más pequeño que éste terminará por deshacerse pues su energía libre disminuye en la dirección en la que el número de partículas n tiende a cero. Sin embargo, si el núcleo formado tiene un tamaño superior al crítico puede comenzar a crecer y contribuir a la transformación de fase.

Cuando la temperatura a la que se mantiene el sistema en transformación es muy cercana a la de coexistencia de

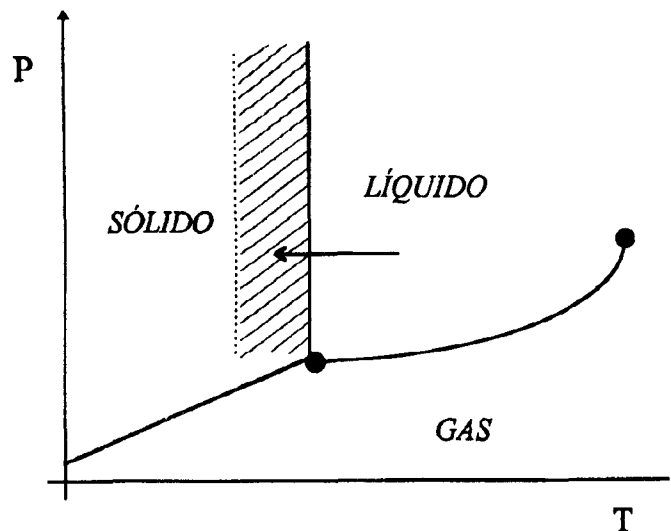


Figura 3. Diagrama de fases para una sustancia pura en el espacio Presión (P)- Temperatura (T). Las líneas sólidas representan estados de coexistencia de dos fases. En la región sombreada el líquido es metaestable frente al sólido.

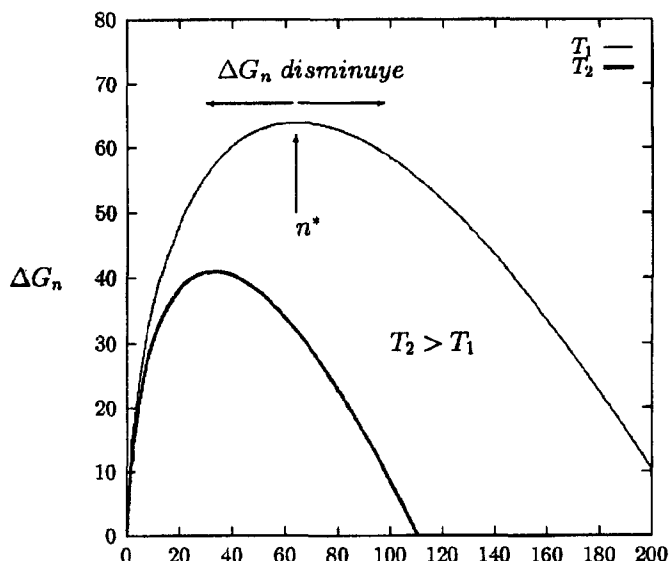


Figura 4. El costo energético ΔG_n para formar un cúmulo de n partículas presenta un máximo para el núcleo de tamaño crítico n^* . Sólo cuando $n > n^*$ el núcleo formado puede crecer de tamaño y contribuir a la transformación de fase. Cuando la temperatura T aumenta, el tamaño y el costo energético de formar el núcleo crítico disminuyen.

fases, la probabilidad de formación de los núcleos se reduce. En estas condiciones se forman menos núcleos y la transición de fases se da más lentamente. Como la formación de un cristal perfecto requiere de tiempo para que las partículas se acomoden dentro de la estructura, estas condiciones pueden favorecerlo. Por otro lado, si la temperatura se reduce mucho en comparación con su valor en la coexistencia, el número y la rapidez de formación de núcleos de la nueva fase se incrementa y es más probable que el material generado presente defectos o sea un sólido amorfo (Holden, 1993).

La presencia de defectos modifica las propiedades físicas del cristal que se forma. Por ello, la posibilidad de controlar su aparición durante el proceso de crecimiento de los núcleos sólidos es de gran utilidad práctica. En algunas aplicaciones, como en dispositivos láser, o para realizar un análisis de rayos X de la estructura cristalina de una sustancia, se requiere de monocristales con el menor número de defectos posibles. Sin embargo, la presencia de defectos puede incrementar la resistencia a la fractura de un material cristalino, y en estos casos el enfriamiento rápido o la adición de impurezas son el mejor camino.

Experimentar...

Un cristal no sólo puede formarse a partir de un líquido "sobreenfriado" como se ha descrito. En la actualidad se

emplean técnicas diversas que implican procesos diversos como depositación electroquímica, calentamiento de muestras sólidas amorfas, difusión controlada, etcétera (Hurle, 1993). Un camino sencillo es el de obtener cristales a partir de una disolución "sobresaturada". Este procedimiento tiene ciertas ventajas en la preparación de grandes monocristales pues el material que se deposita sobre los núcleos de crecimiento tiene que difundirse a través del disolvente en el que se encuentra, y la cristalización se da más lentamente (Holden, 1993).

A temperatura constante, un disolvente es capaz de disolver una cantidad máxima de soluto y esto determina la solubilidad del material. Cuando se alcanza esta condición se dice que la disolución está saturada. La solubilidad de un material es función de la temperatura y en general se incrementa con ella como se muestra en la figura 5.

De manera similar a lo que sucede al enfriar el líquido de una sustancia pura, para cristalizar el soluto presente en una disolución podemos enfriarla hasta rebasar la frontera de solubilidad y alcanzar un estado metaestable (ver figura 5). En estas condiciones la disolución contiene más material disuelto del que corresponde a su estado de equilibrio a esa temperatura y se dice que está sobresaturada. Es entonces cuando se puede inducir la formación de cristales.

Para crecer monocristales en el laboratorio puede seguirse la siguiente técnica que permite obtener cristales a partir de una disolución sobresaturada (Baer, 1990; Holden, 1993). El trabajo se inicia preparando núcleos de cristaliza-

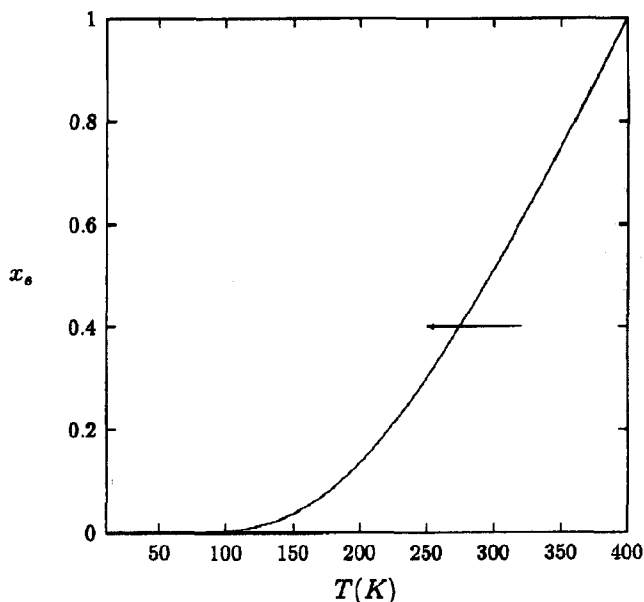


Figura 5. La solubilidad en agua de muchas sales aumenta con la temperatura. Al disminuir la temperatura a concentración constante puede alcanzarse un estado sobresaturado como el que marca la flecha de la figura.

ción o “semillas”, los cuales se suspenden en una disolución sobresaturada con la sal de interés manteniendo la temperatura entre 22 y 30 °C. Posteriormente se tapa el recipiente y se le coloca en un lugar donde este libre de cualquier tipo de movimiento o cambio brusco de temperatura. Al cabo de uno o dos días se observa que la semilla incrementa su tamaño entre 3 y 20 veces dependiendo de la sustancia que se esté cristalizando y el tamaño inicial de la semilla.

a) *Preparación de semillas:* Una semilla es un pequeño monocristal de mínimo 3 mm y máximo 8 mm de lado, lo que facilita su manipulación y evita que se formen maclas en el cristal en crecimiento. Las maclas son bordes indeseables en las paredes del monocristal que pueden parecer parches o cristales pequeños empotrados en las paredes del sistema.

Para preparar las semillas se utilizan 25 mL de una disolución saturada de la sal de interés (ver datos los datos en la tabla 1 para 4 sales distintas), la cual se deja evaporar en un vaso de precipitados grande o en un cristizador. Las semillas tardan de uno a tres días en formarse, pero es muy importante que se les vigile por lo menos una vez al día para cuidar que no precipite demasiada sal y se forme una masa policristalina en el fondo del recipiente. Es recomendable hacer un buen número de semillas de una sola vez para poder repetir rápidamente los ensayos si estos fallan, lo que suele pasar las primeras veces que se intenta crecer monocristales ya que, aunque no se trata de una técnica complicada, sí requiere de un poco de destreza.

Una vez que se tienen la semillas se seleccionan aquellas que no tienen ningún defecto físico apreciable: sus bordes están bien definidos, no están estrelladas, no les falta un pedazo. Las semillas deben tener la forma de algún poliedro regular, sin imperfecciones o, de lo contrario, darán lugar a un cristal con gran número de defectos.

b) *Preparación de la disolución sobresaturada para crecer el monocristal:* La disolución sobresaturada se prepara mezclando las cantidades de agua destilada recién hervida (por lo menos 5 minutos) y de sal indicadas en la tabla 1. La mezcla se realiza cuando la temperatura del agua hervida desciende por debajo de los 70 °C, agitando constantemente hasta que la sal se disuelva. Trabajar con agua hervida reduce la posibilidad de formación de defectos en el cristal en crecimiento, por eliminación de parte de los gases disueltos en el líquido.

La disolución sobresaturada debe filtrarse para eliminar las impurezas insolubles de los reactivos. Si se cuenta con sistema de filtración al vacío, es conveniente utilizarlo pues se evita que la disolución se enfríe demasiado y comience a cristalizar en el embudo. También es recomendable no dejar la disolución sometida por mucho tiempo a la presión reducida porque esto provoca enfriamiento y evaporación excesiva del líquido. El filtrado se vacía cuidadosamente en un

Tabla 1

Sal	Disolución saturada	Disolución sobresaturada	Tiempo de crecimiento
Tartrato de sodio y potasio	130 g/ 100 mL agua	136.5 g/ 100 mL agua	un día
Nitrato de sodio	90.8 g/ 100 mL agua	94.5 g/ 100 mL agua	
Sulfato de cobre	40 g/ 100 mL agua	50 g/ 100 mL agua	dos días
Alumbre	13.9 g/ 100 mL agua	15.5 g/ 100 mL agua	dos días

* Las cantidades que se mencionan en esta tabla pueden variar en función de la pureza de los materiales empleados.

vaso de precipitados y se deja enfriar, sin moverlo o agitarlo, hasta que alcance la temperatura ambiente.

Es necesario aclarar que las cantidades que se listan en la tabla 1 son adecuadas para la cristalización a una temperatura ambiente entre 22 y 30 °C. Al verificar la temperatura de la disolución es necesario tener especial cuidado en no agitar demasiado el medio, pues esto puede inducir la cristalización acelerada.

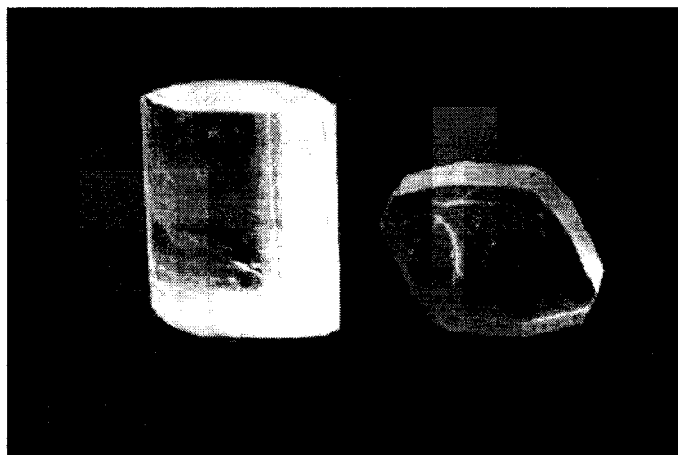
c) *Suspensión de la semilla:* Ya que la disolución sobresaturada ha alcanzado una temperatura menor a los 30 °C puede suspenderse en ella la semilla; para hacerlo se utilizan cabellos o hilos de nylon delgados. La semilla se amarra al cabello o hilo (la manera más recomendable es utilizar un nudo corredizo) y se suspende aproximadamente en el centro del volumen total de la disolución. Para mantenerla en su lugar es conveniente colocar una cinta adhesiva de un lado a otro de la boca del vaso y colgar de ella el hilo o cabello.

Una vez que la semilla está en su lugar, el vaso se tapa con un pedazo de plástico y una liga, dejando reposar el sistema por uno o dos días (generalmente 1 día es suficiente). Es importante que durante todo el proceso la disolución no se mueva y que la semilla sea introducida con delicadeza para no perturbar la condición de metaestabilidad. En la figura 6 se presentan ejemplos del tipo de cristales que pueden obtenerse por este método.

La técnica descrita es más propensa a la formación de imperfecciones en el cristal que el método de crecimiento por evaporación de una disolución saturada (Holden, 1993). Sin embargo, el procedimiento elegido es excelente para fines didácticos, pues los cristales crecen en menos tiempo y es posible controlar las características del estado metaestable en el que se forman cambiando la concentración de la sal.

...y simular

Para simular el crecimiento de un cristal haciendo uso de la computadora es necesario plantear un modelo en el que se



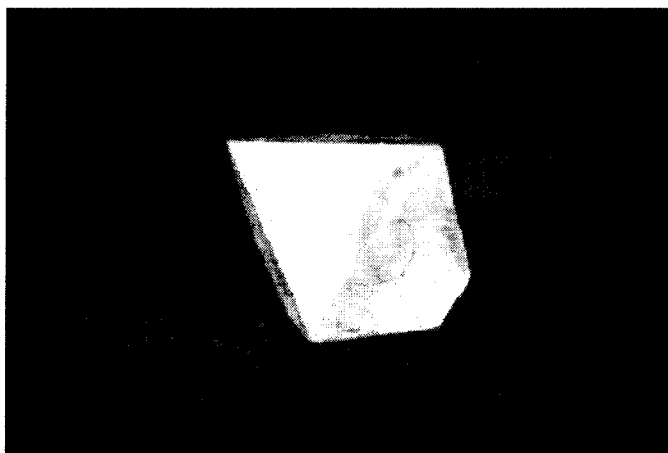
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6. Fotografías de los cristales de sales diversas obtenidos siguiendo el método descrito en el texto. *a)* Tartrato de sodio, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ortorrómbico); *b)* Nitrato de sodio, NaNO_3 (hexagonal); *c)* Sulfato de cobre, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (triclínico); *d)* Alumbre, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (cúbico).

reconozcan los factores principales que influyen sobre dicho proceso. En general los modelos de crecimiento cristalino tienen dos ingredientes esenciales: una parte geométrica y una parte dinámica (Levi, 1997).

Desde el punto de vista geométrico es importante considerar, por ejemplo, si las partículas que se integrarán al cristal pueden ocupar cualquier posición en el espacio (modelo continuo), o sólo ciertas posiciones dentro de una red con cierta simetría (modelo discreto). Este último tipo de modelo es más sencillo de manejar en una simulación computacional y es el que se ha elegido en este trabajo. Para simplificar aún más el problema, analizaremos el crecimiento de un cristal sobre una malla cuadrada en dos dimensiones.

Desde el punto de vista dinámico conviene considerar que las partículas que se integran al cristal se mueven independientemente unas de otras y que existen tres procesos básicos en los que pueden participar:

- depósito sobre la superficie del núcleo en crecimiento,
- migración de una posición a otra sobre o dentro del cristal,
- desorción desde el núcleo cristalino.

La difusión de las partículas de soluto a través del disolvente es otro proceso importante, pero no ha sido tomado en cuenta en este trabajo. En este sentido el modelo es más adecuado para describir la formación de un sólido cristalino en el seno de su vapor que en el seno de una disolución.

El método cinético de Monte Carlo es una de las técnicas de simulación más empleadas para estudiar el crecimiento de cristales (Levi, 1997). Su objetivo central es tratar de reproducir la evolución temporal del sistema bajo estudio. Para lograrlo, las partículas se movilizan de un lugar a otro con una frecuencia que es proporcional a las constantes de velocidad de los procesos en los que participan. El programa computacional en lenguaje BASIC que se anexa ilustra la aplicación del método al caso de crecimiento cristalino.

El programa comienza definiendo el número total de celdas $N_c \times N_c$ que constituyen el sistema y se asignan valores a las constantes de velocidad para los procesos de adsorción (K_a), migración (K_m) y desorción (K_d) de partículas. En un sistema real, estos parámetros están determinados por la naturaleza de las interacciones entre los átomos o moléculas y pueden estimarse por medios experimentales (Levi, 1997). Los valores que se les asignan en el programa pueden modificarse para estudiar el efecto sobre la formación y crecimiento del núcleo sólido.

La probabilidad (P_a , P_m , P_d) con la que cada partícula puede participar en alguno de los procesos básicos antes listados se define en términos de las constantes de velocidad K_i , de forma que $P_i = K_i / \sum K_i$ (la constante de velocidad del proceso entre la suma de las constantes para todos los procesos posibles). Antes de dar inicio a la simulación es también necesario elegir una configuración inicial para el sistema. En este caso se asume que el cristal está formado por una sola partícula (semilla) localizada en el centro de la malla cuadrada. La variable $cris(x, y)$ puede tomar los valores 0 ó 1 en cada punto de la red, lo que indica si el sitio está vacío o lleno, respectivamente.

Para dar comienzo a la simulación se elige un punto de la malla al azar y se determina el número de sus vecinos más cercanos vec . El valor de este parámetro determina el proceso a realizar. Por ejemplo, si el sitio está vacío y no tiene vecinos ($vec=0$) o está completamente rodeado por ellos ($vec=4$), se considera que su estado no cambiará pues es difícil que una partícula se deposite en tales condiciones. Si $0 < vec < 4$, sin embargo, se abre la posibilidad de que una nueva partícula se deposite en ese lugar con una probabilidad P_a .

Si la posición seleccionada está ocupada ($cris(x, y) = 1$) se tiene dos posibilidades. La partícula puede separarse del núcleo cristalino con una probabilidad P_d siempre y cuando no esté completamente rodeada por otras partículas, o puede migrar a un sitio vecino con una probabilidad P_m . En este último caso, para permitir la migración, se requiere verificar si la posición vecina seleccionada al azar está vacía y tiene vecinos que favorezcan el desplazamiento.

Este procedimiento de selección al azar de un sitio sobre la malla y toma de decisiones sobre el proceso físico que puede llevarse a cabo se repite un número N_t de veces en el programa. Como resultado, en la pantalla de la computadora se observa el crecimiento del sólido a partir de una semilla (figura 7). Es importante mencionar que en ocasiones la semilla o el núcleo en crecimiento desaparecen antes de rebasar un tamaño crítico que da lugar al cristal. En estos casos es conveniente reiniciar la simulación hasta que la formación del cristal sea el proceso favorecido.

El programa de simulación que se presenta es una versión simplificada que ilustra los principios básicos del método cinético de Monte Carlo para el análisis de fenómenos que ocurren lejos de la situación de equilibrio. Se recomienda revisar la bibliografía (Levi, 1997) para comprender el tipo de modificaciones que es necesario introducir para generar un modelo más realista. Sin embargo, a pesar de su simplicidad, el programa resulta muy útil para analizar la relevancia de los diversos procesos dinámicos involucrados en el crecimiento de un cristal.

Al trabajar con una simulación como ésta sin duda alguna quedarán muchas dudas. ¿Por qué el cristal formado no tiene ninguna simetría en particular? ¿Qué pasaría si se tomara en cuenta la difusión de las partículas desde el seno de una disolución? ¿Cómo podría introducirse el efecto de la temperatura? Pero en realidad ése es el objetivo de este ejercicio: despertar la curiosidad por tratar de comprender qué procesos o fenómenos dan lugar a la diversidad de formas y patrones que observamos en la naturaleza.

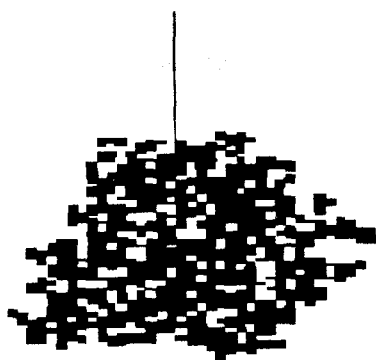


Figura 7. Despliegue en la pantalla de la computadora del resultado de la simulación del crecimiento de un cristal.

PROGRAMA PARA SIMULAR EL CRECIMIENTO DE UN CRISTAL

```

CLS
SCREEN 2
RANDOMIZE TIMER
REM 'Definición de parámetros para el sistema'
Nc=80
DIM crs(Nc+2,Nc+2)
WINDOW (-2,-2)-(Nc+5,Nc+5)
LINE (-1,-1)-(Nc+3,Nc+3),,B
LINE (Nc/2,Nc+3)-(Nc/2,Nc/2)
Ka=4: Kd=1: Km=2
Sk=Ka+Kd+Km
Pa=Ka/Sk: Pd=Kd/Sk: Pm=Km/Sk
REM 'Condiciones iniciales'
FOR x=0 TO Nc+1
  FOR y=0 TO Nc+1
    crs(x,y)=0
  NEXT Y
NEXT X
REM 'Introducción de la semilla'
crs(Nc/2,Nc/2)=1
LINE (Nc/2,Nc/2)-(Nc/2+1,Nc/2+1),1,BF
REM 'Evolución temporal'
FOR Nt=1 TO 1.e5
  x=INT(RND*Nc)+1
  y=INT(RND*Nc)+1
  Vec=crs(x+1,y)+crs(x-1,y)+crs(x,y+1)+
    crs(x,y-1)
  Ap=RND
  IF crs(x,y)=0 AND (Vec=0 OR Vec=4) THEN 25
  IF crs(x,y)=1 THEN 5
  IF Ap<Pa THEN crs(x,y)=1
  GOTO 20
5 IF Ap>=Pa AND Ap<(Pa+Pd) AND Vec<4 THEN 10
  IF Ap<(Pa+Pd) THEN 25
  xv=x+INT(3*RND)-1
  yv=y+INT(3*RND)-1
  Vv=crs(xv+1,yv)+crs(xv-1,yv)+crs(xv,yv+1)+
    crs(xv,yv-1)
  IF crs(xv,yv)=1 OR Vv=0 THEN 25
  crs(xv,yv)=1
  LINE (xv,yv)-(xv+1,yv+1),1,BF
10 crs(x,y)=0
20 n=crs(x,y)
  LINE (x,y)-(x+1,y+1),n,BF
25 NEXT Nt
END

```

Bibliografía

Adamson A.W., *Physical Chemistry of Surfaces*, John Wiley & Sons, New York, 1967, p. 375-387.
 Atkins, P.W., *Physical Chemistry*, 3rd ed., W.H. Freeman and Company, New York, 1986.
 Baer, C.D., The growth of large single crystals, *J. Chem. Educ.* 67[5], 410-412 (1990).
 Holden, A. Morrison, P., *Crystals and Crystal Growing*, MIT Press, Boston, 1993.
 Hurle, D.T.J., *Handbook of Crystal Growth*, North-Holland; Amsterdam, 1993.
 Levi A.C. and Kotrla, M., Theory and simulation of crystal growth, *J. Phys: Condens. Matter*, 9, 299-344 (1997).
 Narayan, B., *Crystal Growth from Melts*, John Wiley & Sons, London, 1992.
 Oxtoby, D.W., *Nucleation*, en: *Fundamentals of Inhomogeneous Fluids*, Ed. D. Henderson, Marcel Dekker, New York, 407-442, 1992.
 Pamplin, B.R., *Crystal Growth*, Pergamon Press, New York, 1975.
 Toulmin, S. and Goodfield, J., *The Architecture of Matter*, Harper and Row, New York, 1996.

Aprovechen la oferta!
 ¡Vence en septiembre!



El Consejo Editorial, después de decidir cambiar la periodicidad de trimestral a bimestral, ha abierto un periodo de oferta para captar más suscriptores.

Educación Química mantendrá el costo actual de suscripción hasta el mes de octubre de 1998. Ésta es la oportunidad

para que aquellos cuya suscripción vence en 1998 nos envíen \$120.00 o US\$25.00 (para los servicios al extranjero) y queden de esta manera suscritos durante 1999 a un precio subsidiado.

La oferta se extiende a quienes no están suscritos aún, y que podrán pagar su suscripción por los años de 1998 y 1999 con el pago de \$200.00 o US\$45.00

Hemos resuelto el problema de poder recibir pagos por la vía del cargo a una tarjeta de crédito nacional o internacional. Basta recortar y llenar el formato incluido en este ejemplar, y enviarlo firmado a nuestro apartado postal para renovar la suscripción por 1999 o hacer una de los años 1998 y 1999 (en este último caso los suscriptores recibirán en un solo envío todos los números de este año que ya han aparecido). Quienes deseen hacer el cargo a tarjeta de crédito pueden enviarnos el formato por fax al (525) 622 3711.