

# Simulación de procesos: cuencas hidrológicas y cuencas visuales

por [Angel Manuel Felicísimo](http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/), biólogo  
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>



## Introducción

Como ya se ha indicado en el primer tema, uno de los aspectos de mayor interés de los modelos digitales es la posibilidad de realizar **simulación de procesos**. Con la simulación de procesos se accede a la capacidad de experimentar independientemente del sistema real. La simulación permite obviar los riesgos inherentes a la experimentación, alcanzar una completa independencia temporal —los procesos pueden ser acelerados o ralentizados— y repetir el experimento el un número de veces arbitrario.

La simulación se ha utilizado ampliamente en aspectos prácticos en muchas disciplinas. En ingeniería aeronáutica, por ejemplo, el túnel de viento era hasta hace poco el único dispositivo accesible para perfeccionar el diseño externo de los aviones. Este sistema analógico ha sido sustituido por simulaciones digitales donde ni siquiera es necesario construir una maqueta real del prototipo. Otro ejemplo lo constituye el diseño de planes de emergencia ante escapes de contaminantes atmosféricos, donde las pautas de dispersión se simulan y analizan mediante modelos numéricos, tanto en el espacio como temporalmente.

En principio, a partir de los MDT es posible simular una gran cantidad de procesos inaccesibles a la experimentación directa. En este tema se expondrá una panorámica de métodos para realizar simulaciones en campos muy variados.

El primer tópico que vamos a examinar es el de los denominados autómatas celulares, de los cuales podemos ver un ejemplo en la figura inferior, donde se ha simulado el comportamiento de un bandada de *animats* de comportamiento gregario basándose en reglas simples de atracción/repulsión en función de la distancia a los vecinos más próximos.

## Cuencas hidrológicas

Las características topográficas de una ladera determina las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El modelo digital de elevaciones contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial —*stream network*— y, por extensión, de la cuenca hidrológica —*watershed*—. Para el estudio de estos procesos se utilizará un conjunto de algoritmos denominados habitualmente **autómatas celulares**, **AC**. Los AC han sido poco utilizados en los SIG, pero se presentan aquí por dos razones: (1) representan una forma de abordar los problemas diferente de la convencional y, (2) pueden ofrecer soluciones nuevas a algunos problemas más difíciles de tratar por otros medios.

## Autómatas celulares

Un **autómata celular**, **AC**, es un modelo matemático que simula sistemas dinámicos y que puede utilizarse para modelizar procesos reales.

Los AC pueden funcionar en espacios de  $d$  dimensiones. Los AC funcionan sobre una matriz regular  $d$ -dimensional, por lo que pueden ser aplicados directamente al caso de los MDT matriciales como los utilizados hasta ahora en este curso. En el caso de los modelos digitales del terreno,  $d=2$  y a partir de ahora, salvo aviso, nos limitaremos a este caso.

En el contexto bidimensional, los AC obedecen a un conjunto reducido de reglas:

- la organización matricial define el "universo" de celdas o lugares sobre los que se desarrolla el proceso
- cada celda puede adoptar un valor  $a$ , dentro de un conjunto finito de valores:  $a \in \{1, 2 \dots k\}$
- los valores de cada celda se actualizan a intervalos de tiempo finitos y discretos,  $t, t+1 \dots$  hasta que el proceso finaliza
- la asignación de valores a cada celda  $i$ , obedece a una función o **regla de propagación** que depende del valor de la propia celda y de los vecinos más próximos; por ejemplo:

$$a_{i,j}^{(t+1)} = \xi \left[ a_{i,j}^t, a_{i-1,j}^t, a_{i+1,j}^t, a_{i,j-1}^t, a_{i,j+1}^t \right] = \xi \left[ \bigcup a^t \right]$$

donde  $a_{i,j}^{(t+1)}$  es el valor de la celda  $a_{i,j}$  en la iteración  $(t+1)$ ; la expresión de la derecha, más resumida, se interpreta como el conjunto de estados del entorno de la celda problema.

El origen de los autómatas celulares, está en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton en la década de los 50, y tiene como responsables a John von Neumann y Stanislaw Ulam. Este último fue el que sugirió la extensión de los iniciales autómatas unidimensionales a un "universo" de dos dimensiones a similitud de un tablero de ajedrez.

Actualmente se considera que, mediante reglas de interacción local, es posible generar modelos útiles sobre sistemas físicos y, obviamente, este es el aspecto que aquí nos interesa.

En el interior de la matriz debe especificarse un entorno que cada celda debe examinar para pasar del estado  $a^t$  a  $a^{(t+1)}$ . Este entorno es conceptualmente idéntico al utilizado en los operadores de cálculo del gradiente, ya examinados en el tema anterior. Inicialmente, von Neumann redujo el entorno a los 4 vecinos más próximos —entorno de von Neumann—; la ampliación a los 8 vecinos se conoce como entorno de Moore.

El número de estados posibles en cada celda es otra de las variables importantes del sistema. Existen numerosos ejemplos de sistemas "interesantes" de naturaleza estrictamente binaria. En el caso de los MDT es claro que el número de estados depende de la naturaleza del problema y, habitualmente, será algo superior. Sin embargo, lo más importante es la regla de asignación que, para generar transiciones de estado adecuadas debe ser internamente consistente y representativa del proceso estudiado.

La ampliación que resulta más útil para la simulación de procesos es la de asignar a las celdas un conjunto de atributos que intervienen en la regla de asignación de estados. Es decir, dada una

celda situada en la fila  $i$ , columna  $j$  de la matriz, su estado  $a_{i,j}^{(t+1)}$  dependerá del estado de sus vecinas en  $t$ , y de los valores de un conjunto de variables  $v_1, v_2 \dots v_m$  propios de cada celda del entorno.

$$a_{i,j}^{(t+1)} = \xi \left[ \begin{array}{c} \cup a^t \\ \cup v_1^t \\ \cup v_2^t \\ \dots \\ \cup v_m^t \end{array} \right]$$

## La generación de líneas de flujo

Se denomina **línea de flujo** al trayecto que, a partir de un punto inicial, seguiría la escorrentía superficial sobre el terreno. Las líneas de flujo dentro del MDE siguen la línea de máxima pendiente y sólo finalizan en los supuestos de desembocar en el mar o llegar al borde del modelo y, optativamente, de alcanzar una concavidad topográfica.

El **sentido del flujo** para cada celda del MDE es una constante, por lo que el resultado de la simulación es estacionario y no varía a partir de una iteración determinada, en función de la longitud de la línea.

Es posible construir un AC sencillo que genere las líneas de flujo a partir de los datos de altitud del MDE. Sus características son las siguientes:

- estados: se trata de un AC binario donde las celdas pueden tomar sólo dos valores  $\{0, 1\}$

$$a^t = \begin{cases} 0 \Rightarrow a \notin L \\ 1 \Rightarrow a \in L \end{cases}$$

donde  $L$  es la línea de flujo

- entorno: los 8 vecinos más próximos y la propia celda
- variables auxiliares:  $z$ , altitud
- reglas de propagación:
  - el inicio es una única celda donde  $a_{i,j}^0 = 1$
  - la propagación se realiza a la celda que cumpla la condición de pendiente máxima negativa desde la celda anterior
  - tiempo: el AC funciona hasta que la celda a la que se propaga ya pertenece a la línea de flujo o no existe candidata con pendiente negativa —lo que implica una concavidad o una zona plana sin trayectoria definida—.

En este caso, puede observarse que la pendiente se define con signo, para diferenciar la pendiente ladera arriba —positiva— de la de ladera abajo —negativa—.

El proceso se puede representar de la forma siguiente: se señala una celda origen de la línea de

$$\text{flujo } a_{i,j}^0 = 1$$

	ESTADOS, $a$			VARIABLE, $v$			TIEMPO, $t$
	$j-1$	$j$	$j+1$	$j-1$	$j$	$j+1$	
$i-1$	0	0	0	$z_8$	$z_1$	$z_2$	0
$i$	0	1	0	$z_7$	$z_0$	$z_3$	
$i+1$	0	0	0	$z_6$	$z_5$	$z_4$	

Definidos los valores de la variable auxiliar para la celda y su entorno, se calculan los valores de las pendientes locales:

$$p_1 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_1}{d}; \quad p_2 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{2} \cdot d}; \quad \dots \quad p_8 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_8}{\sqrt{2} \cdot d}$$

La regla de propagación define la celda que cambiará de estado en función de los valores de la pendiente que, en este caso, tienen signo:

$$a_m^{t+1} \leftarrow 1 \Rightarrow p_m < p_{n \neq m}$$

Suponiendo que  $m=4$ , es decir, que la pendiente máxima ladera abajo señala la diagonal inferior derecha, la transición será:

	$t=0$			$\rightarrow$	$t=1$		
	$j-1$	$j$	$j+1$		$j-1$	$j$	$j+1$
$i-1$	0	0	0		0	0	0
$i$	0	1	0		0	1	0
$i+1$	0	0	0		0	0	0

El anterior AC genera líneas que crecen sobre la matriz y cuya longitud depende de las iteraciones necesarias para llegar a que se cumpla alguna de las condiciones de finalización. En cada iteración se calcula para cada celda un **sentido de flujo**, es decir, la dirección de máxima pendiente ladera abajo en su entorno inmediato. Una línea de flujo está compuesta, por tanto, por una secuencia ordenada de sentidos de flujo.

Los sentidos de flujo individuales pueden ser codificados mediante los denominados **códigos de Freeman** (Freeman, 1961). En vez de definir una cadena de celdas —como las que componen una línea flujo, por ejemplo— mediante sus coordenadas, se definen mediante códigos que representan los incrementos de fila y columna.

La regla de propagación del AC mostrado antes calcula todo lo necesario para generar los códigos de Freeman de las celdas de una línea de flujo pero no los almacena. Una simple variante puede construir en un único paso los códigos para todas las celdas:

- estados: las celdas pueden tomar 9 valores  $\{0, 1, 2 \dots 8\}$ . El estado 0 significa que la celda no tiene sentido de flujo —concavidad— o este se es indefinido —zona plana—; el estado 1 supone que la celda drena hacia el N, 2 hacia el NE, etc. hasta el 8 que corresponde al NO.
- entorno: los 8 vecinos más próximos y la propia celda

- variables auxiliares:  $z$ , altitud
- reglas de propagación
  - se inicia simultáneamente en todas las celdas, con  $a_{i,j}^0 = 0$
  - la propagación se realiza a la celda que cumpla la condición de pendiente máxima negativa que adopta el estado correspondiente en función de la posición de la celda inicial
  - se finaliza en un único paso:  $t=1$

El proceso se puede representar de la forma siguiente: se señala una celda origen de la línea de flujo  $a_{i,j}^0 = 1$

	ESTADOS, $a$			VARIABLE, $v$			TIEMPO, $t$
	j-1	j	j+1	j-1	j	j+1	
i-1	0	0	0	$z_8$	$z_1$	$z_2$	0
i	0	1	0	$z_7$	$z_0$	$z_3$	
i+1	0	0	0	$z_6$	$z_5$	$z_4$	

Definidos los valores de la variable auxiliar para la celda y su entorno, se calculan los valores de las pendientes locales:

$$p_1 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_1}{d}; \quad p_2 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{2} \cdot d}; \quad \dots \quad p_8 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_8}{\sqrt{2} \cdot d}$$

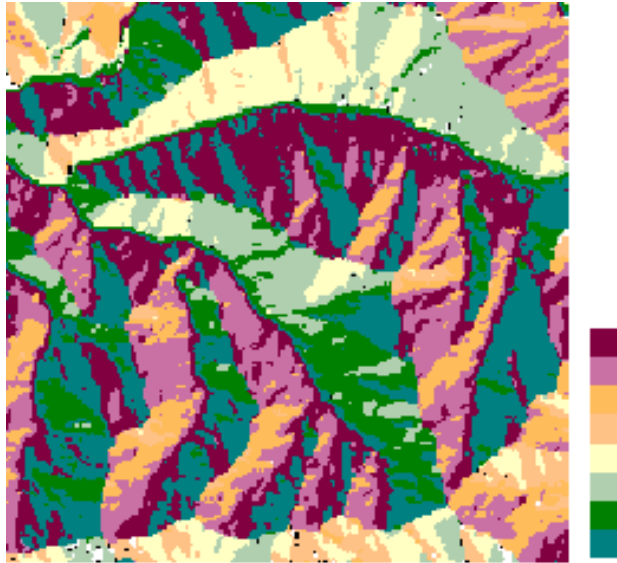
La regla de propagación define la celda que cambiará de estado en función de los valores de la pendiente:

$$a_m^{t+1} \leftarrow m \Rightarrow p_m < p_{n \neq m}$$

Suponiendo que  $m=4$ , es decir, que la pendiente máxima ladera abajo señala la diagonal inferior derecha, la transición será:

	t=0			→	t=1		
	j-1	j	j+1		j-1	j	j+1
i-1	0	0	0		0	0	0
i	0	0	0		0	4	0
i+1	0	0	0		0	0	0

Repetiendo el proceso para la totalidad de las celdas, se obtiene una matriz de códigos de flujo, cuyos valores indican el sentido de máxima pendiente en función de la topografía local.



**Códigos de flujo de la cuenca de Tormaleo, una zona de montaña del SO de Asturias.**

## La definición de cuencas hidrológicas

La delimitación de cuencas hidrológicas puede realizarse mediante un AC de reglas simples. Para definiremos dos conceptos:

- se define el área subsidiaria de una celda como el conjunto de elementos del MDE cuyas líneas de flujo convergen en ella
- por extensión, una cuenca hidrológica está formada por el área subsidiaria de una celda singular, que actúa como sumidero

Por tanto, el área subsidiaria puede establecerse para cualquier celda del MDE, mientras que no todos las celdas son sumidero de una cuenca hidrológica. De cualquier forma el AC puede comenzar en una celda arbitraria, sin establecer necesariamente condición alguna de singularidad.

La delimitación de cuencas ha sido un tópico suficientemente tratado en la bibliografía aunque, aparentemente, no mediante autómatas celulares. Uno de los algoritmos más citados es el propuesto por Collins (1975), que opera de la forma siguiente:

1. Los puntos del MDE se ordenan en función de su altitud. El orden de dos puntos con el mismo valor de elevación no tiene importancia. A todos se les asigna un cero como número de cuenca.
2. Se localiza el punto  $P(i)$  de menor altitud del MDE. Se le asigna el número de cuenca 1.
3. Se localiza el punto siguiente de mínima altitud  $P(j)$  y se examinan los valores de cuenca de los 4 vecinos más próximos del mismo. Pueden ocurrir 3 casos:
  1. Uno o más tienen algún valor diferente de cero pero igual entre sí: al punto  $P(j)$  se le asigna este mismo valor. Se continúa en el paso 3.
  2. Ninguno tiene un valor previo distinto de cero: se le asigna a  $P(j)$  un nuevo número de cuenca; se sigue en el paso 3.

3. Dos o más tienen números de cuenca diferentes de cero y diferentes entre sí: el punto  $P(j)$  es una divisoria de cuencas y se le asigna un valor especial; se sigue en el paso 3.

Se ha comprobado que el algoritmo de Collins no funciona satisfactoriamente cuando se aplica en su forma original ya que es frecuente que los datos con la misma altitud no sean adyacentes. Por este motivo se multiplican las cuencas y las líneas divisorias, especialmente si el análisis se realiza exclusivamente con los 4 vecinos más próximos como propone el autor —ver una crítica detallada en Douglas, 1986—.

En Felicísimo (1994) se propone un método alternativo basado en las líneas de flujo. Inicialmente se les asigna el valor de cuenca 0 a todos los puntos del MDE; a continuación se sigue el proceso siguiente:

1. Se elige un punto  $P(i)$  del MDE y se comprueba si está asignado a alguna cuenca. En caso afirmativo se continúa con el siguiente punto del modelo; en caso negativo se calcula su línea de flujo, compuesta por  $n$  puntos.
2. Se comprueba el valor de cuenca del último punto de la línea. Pueden presentarse dos casos:
  1. El punto final de la línea no está asignado aún a ninguna cuenca —mantiene el valor 0—: se asigna a todos los puntos de la línea un nuevo valor de cuenca y se inicia el proceso con el siguiente punto del MDE
  2. El punto final de la línea es diferente de cero, lo que implica que la línea de flujo comunica con una cuenca preexistente: todos los puntos pertenecientes a la línea actual se asignan a esa cuenca y se inicia el proceso en 1 con un nuevo punto del modelo.

El proceso continúa hasta que todos los puntos del MDE han sido barridos una vez. Puede notarse que todos los puntos se asignan a una cuenca, sin que existan puntos con códigos especiales —como las divisorias de cuencas en el algoritmo de Collins—.

El método puede realizarse partiendo de cualquier punto del modelo, pero resulta preferible operar eligiendo los puntos por orden decreciente de altitud. De esta forma, los perfiles iniciales son los más largos, barren el mayor número de puntos del modelo y el proceso es más breve.

Finalmente, el método basado en el autómata celular está diseñado para definir la cuenca subsidiaria de un punto, aspecto que no está cubierto por los métodos anteriores. En efecto, cuando se trata de definir la totalidad de cuencas de un MDE no hay problema en iniciar el proceso en cualquier celda y repetirlo para cada una de las restantes en cualquier orden, ya que todas deben ser asignadas a una cuenca concreta.

Sin embargo, es imposible conocer con antelación cuál es el camino de los perfiles hidrológicos de cada celda. Por este motivo, para definir qué celdas forman parte de la cuenca subsidiaria de un punto por el método anterior es necesario ejecutar el proceso para todas las celdas del modelo y descartar los perfiles que no pasen por el punto problema. Aunque es posible diseñar algoritmos que incrementen la eficacia del análisis, es obvio que un proceso "ciego" como éste no resulta muy eficaz, especialmente para modelos de grandes dimensiones.

El AC permite realizar el proceso en orden inverso, de abajo hacia arriba, partiendo del punto problema. De esta forma, las dimensiones del análisis quedan acotadas y no es necesario el

proceso exhaustivo mencionado antes. El AC tiene las siguientes características:

- estados: se trata de un AC binario donde las celdas pueden tomar sólo dos valores  $\{0, 1\}$

$$a^t = \begin{cases} 0 \Rightarrow a \notin C \\ 1 \Rightarrow a \in C \end{cases}$$

donde  $C$  es el área subsidiaria de la celda origen

- entorno: los 8 vecinos más próximos y la propia celda
- variables auxiliares:  $z$ , altitud
- reglas de propagación
- el inicio es una única celda donde  $a_{i,j}^0 = 1$
- la propagación se realiza a las celdas que cumpla la condición de pendiente positiva desde la celda anterior
- tiempo: se finaliza cuando se alcance el estado estacionario, es decir, no haya cambios de estado entre dos iteraciones.

El proceso se puede representar de la forma siguiente: se señala una celda origen de la línea de flujo  $a_{i,j}^0 = 1$

	ESTADOS, $a$			VARIABLE, $v$			TIEMPO, $t$
	$j-1$	$j$	$j+1$	$j-1$	$j$	$j+1$	
$i-1$	0	0	0	$z_8$	$z_1$	$z_2$	0
$i$	0	1	0	$z_7$	$z_0$	$z_3$	
$i+1$	0	0	0	$z_6$	$z_5$	$z_4$	

Definidos los valores de la variable auxiliar para la celda y su entorno, se calculan los valores de las pendientes locales:

$$p_1 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_1}{d}; \quad p_2 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{2} \cdot d}; \quad \dots \quad p_8 = \text{tg}^{-1} \frac{z_0 - z_8}{\sqrt{2} \cdot d}$$

La regla de propagación define las celdas que cambiarán de estado en función de los valores de la pendiente con signo:

$$a_m^{t+1} \leftarrow 1 \Rightarrow p_m > 0$$

Suponiendo que  $m = 4, 5$  y  $6$  es decir, que existe pendiente ladera arriba para las celdas mencionadas, la transición será:



	t=0				t=1			
	j-1	j	j+1		j-1	j	j+1	
i-1	0	0	0	→	0	0	0	0
i	0	1	0		0	1	1	0
i+1	0	0	0		0	1	1	0
	0	0	0		0	0	0	0
	0	0	0		0	0	0	0

En la siguiente iteración, se analizarán todas las celdas con valor 1, de forma que se analizará para cada una de las anteriores las celdas subsidiarias vecinas. La propagación del proceso ladera arriba finaliza cuando no existan nuevas celdas con pendiente positiva; en este caso se llega a un estado estacionario que finaliza el análisis.

### La estimación de caudales máximos

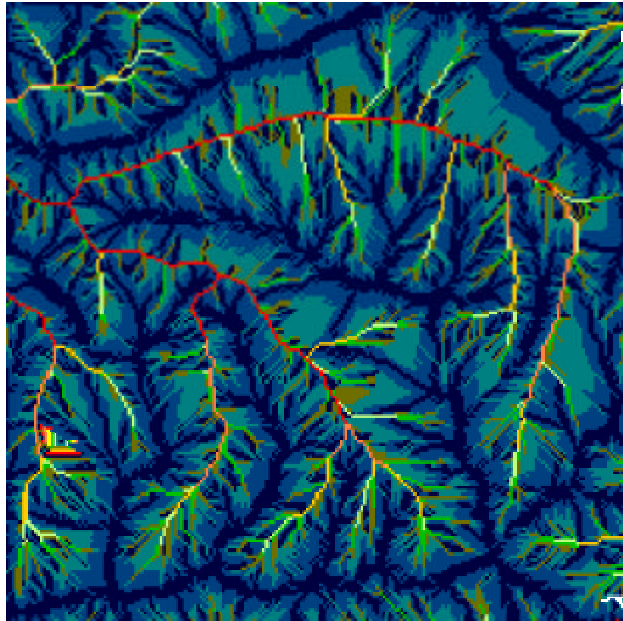
La magnitud del área subsidiaria de un punto del MDE está directamente relacionada con el caudal máximo potencial, CMP, en el mismo. En efecto, el caudal que puede circular en un momento dado en un punto del terreno depende, entre otros factores, de la magnitud del área subsidiaria, de las precipitaciones sobre ella y de la pendiente de la zona, que permite la circulación con menor o mayor rapidez.

Mediante mínimas variantes de los AC descritos anteriormente es posible la estimación del CMP en un punto en el caso más sencillo. Por ejemplo, si se supone una precipitación continua y constante sobre el terreno, el CMP es proporcional al área subsidiaria una vez que se alcanza un estado en el que todas las celdas han tenido tiempo de drenar hacia el punto problema.

Este proceso implica que la mayor parte de los puntos tendrán valores relativamente bajos, especialmente los situados en las zonas de cumbres y crestas y, en menor medida, los constituyentes de las laderas. En cambio, los flujos convergerán en los fondos de los valles y el valor irá aumentando progresivamente aguas abajo hasta alcanzar el valor máximo en el punto que ejerce de sumidero de la cuenca.

El resultado de la simulación es un modelo que representa los valores de caudal máximo potencial en cada punto, supuesto que se alcance una situación de equilibrio en el proceso. La situación de equilibrio llega cuando el número de ciclos elementales —paso de un punto a otro del modelo— ha sido suficiente para completar la línea de flujo más larga. En la realidad, el equilibrio llega cuando tras un periodo de lluvia suficientemente largo, la escorrentía superficial originada en el punto más alejado del sumidero de la cuenca ha tenido ya tiempo de pasar por el mismo.

La simulación de los CMP puede depurarse introduciendo modificaciones en las lluvias, de forma que éstas no sean homogéneas sobre todo el terreno. Para ello deberá disponerse de un MDT auxiliar donde cada celda tenga asignado un valor que representa el agua disponible para circular hacia la celda siguiente. Estos datos pueden determinarse a partir de modelos meteorológicos —gradientes altitudinales, interpolación a partir de estaciones meteorológicas— incorporando, incluso, la influencia de otros factores como la evapotranspiración o la infiltración.

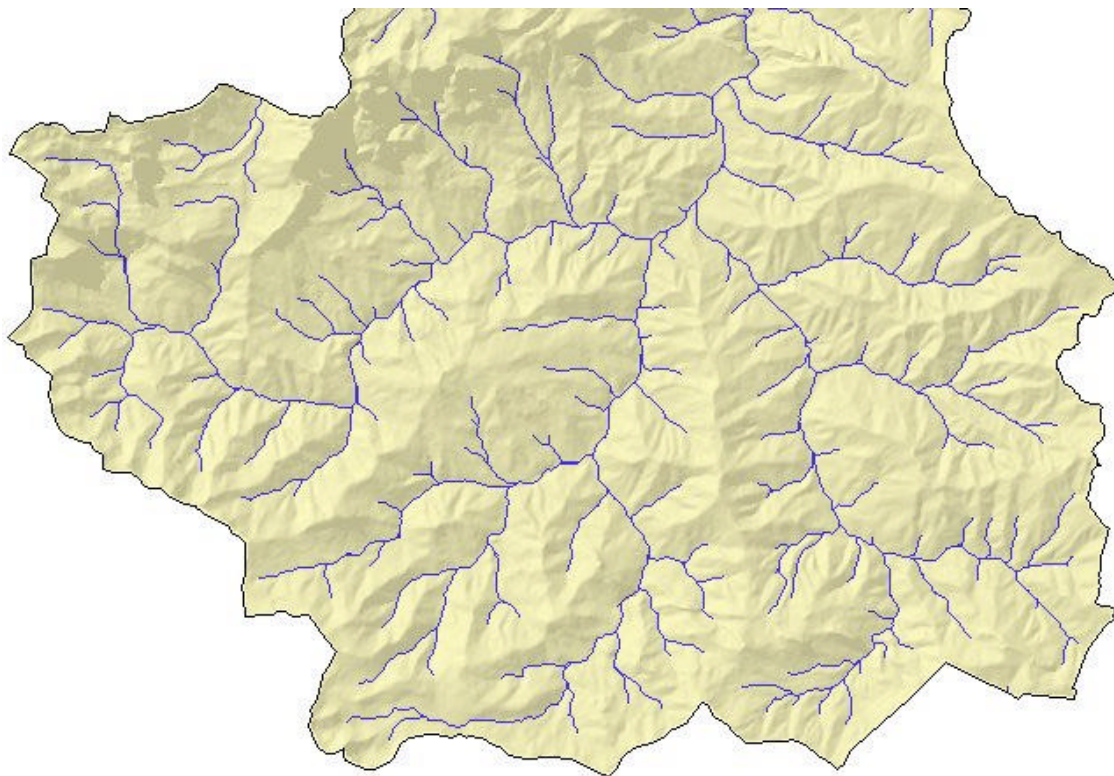


Caudales máximos estimados en la cuenca de Tormaleo. La escala es logarítmica.



Con esta forma de tratar el problema, los estados posibles de cada celda cambian y pasan a ser ahora una función, no sólo del área subsidiaria, sino de la disponibilidad en cada lugar de la cuenca.

La simulación puede analizarse deteniendo el proceso a intervalos variables para conocer la evolución de los caudales en cada momento, hasta llegar al estado de equilibrio. El análisis temporal de esta simulación muestra, por ejemplo, que los caudales máximos en un momento determinado pueden estar en puntos intermedios del cauce, que han recibido fuertes volúmenes de agua y no han tenido aún tiempo para derivarlos aguas abajo.



Red hidrológica del valle de la Liébana (Cantabria) definida introduciendo un umbral en el modelo de caudal potencial. El modelo se ha superpuesto a un sombreado analítico para facilitar su interpretación.

## **Comentarios finales**

Los campos de aplicación de los AC aún no se han manifestado con claridad. Los aspectos más conocidos se refieren a la denominada "vida artificial", un conjunto de AC que presentan patrones de desarrollo vagamente similares a estructuras que se replican, dividen y/o desaparecen. Este tema ha generado una cantidad de bibliografía importante pero unas aplicaciones prácticas aún por desarrollar.

A estos experimentos les falta un aspecto básico y característico de los modelos: no generan resultados que nos descubran nuevos aspectos de la realidad. Hasta el momento, los AC aplicados a la "vida artificial" han generado solamente metáforas más o menos sugerentes pero no datos útiles.

En cuando a los AC en general, los estudios más accesibles tratan sobre sus propiedades matemáticas y topológicas, posibilidad de alcanzar estados estacionarios, caóticos, etc. mientras que las aplicaciones prácticas en temas como los tratados aquí son escasas. Entre los trabajos específicos localizados en la bibliografía pueden mencionarse el Wadge y McKendrick (1993) para la simulación de flujos de lava y el de Gonçalves y Diogo (1994) sobre la aplicación de AC a la simulación de incendios forestales.

## **Cuencas visuales**

Los problemas relativos a la visibilidad de lugares o estructuras tienen importantes aplicaciones prácticas. Los modelos de visibilidad se utilizan por ejemplo para el análisis del impacto visual, el diseño de redes de comunicaciones y la ubicación de torres de vigilancia contra incendios. En el primer caso, el impacto depende de la extensión de la cuenca visual y de factores tales como la presencia de núcleos de población o vías de comunicación; en los otros dos casos, las redes de comunicaciones y vigilancia se establecen buscando un equilibrio entre el mínimo número de elementos y la mayor cobertura posible, bien en términos de población bien atendiendo a la superficie combustible.

El problema básico es determinar si dos puntos están comunicados mutuamente entre sí, es decir, si existe intervisibilidad. Básicamente, dos puntos del terreno son visibles si el segmento rectilíneo que los une no está interrumpido por obstáculos físicos. Esto suele analizarse construyendo el perfil topográfico que los une y analizando la potencial obstrucción topográfica.

Como se expondrá a continuación, para el análisis de este problema se necesita tratar previamente dos aspectos: la estimación de cotas puntuales y la construcción de perfiles topográficos.

### **Estimación de cotas**

Se entiende como tal la estimación de la altitud de un punto de coordenadas arbitrarias en un MDE. Las soluciones son muy diferentes en función de la estructura del modelo. En el caso de un TIN, la altitud de un punto se estima normalmente por interpolación lineal una vez definido el triángulo en el que se inscribe, cuyos vértices son conocidos.

En el caso del modelo matricial cabe la posibilidad de que las coordenadas del punto problema coincidan exactamente con la intersección de una fila y columna, en cuyo caso la solución es trivial. En caso de que el punto problema se encuentre en algún intervalo entre filas y columnas se hace necesario el uso de algoritmos de interpolación.

Los métodos de interpolación aplicados a las estructuras de datos matriciales han sido estudiados

exhaustivamente en el tratamiento de imágenes digitales, donde el remuestreo de los valores de los píxeles es una operación común en la fase de corrección geométrica.

El método más sencillo es el denominado del vecino más próximo —*nearest neighbour*—, donde al punto problema se le asigna la altitud del punto más próximo del modelo. Este método no es una verdadera interpolación —aunque suele llamarse interpolación de orden cero— y se resuelve con una función de redondeo: al punto de coordenadas reales  $(x, y)$  se le asigna la altitud del elemento de la matriz más cercano; la fila corresponde con el entero más próximo a la coordenada  $y$ , y la columna con el de la coordenada  $x$ . En caso necesario, deben traducirse las coordenadas  $(x, y)$  a unidades  $(i, j)$  en función del origen del MDE y del intervalo entre filas y columnas.

Esta opción no suele ser aceptable en el tratamiento de los modelos digitales, donde se desean errores reducidos, tanto en el plano  $XY$  como en la altitud. Es más interesante la realización de una interpolación bilineal utilizando los 4 valores más próximos al punto problema. El tiempo requerido para los cálculos es significativamente mayor que en el caso precedente pero se garantiza la continuidad de los valores y los resultados se ajustan probablemente algo más a la realidad.

Representando la función de truncamiento o parte entera de un número  $k$ , mediante la expresión  $\overset{k}{\lfloor \cdot \rfloor}$ , y dado un punto de coordenadas reales  $(x, y)$ , se definen los puntos del modelo más próximos:  $(i, j)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j)$ ,  $(i+1, j+1)$ , donde  $i = \lfloor y \rfloor$  y  $j = \lfloor x \rfloor$ . Las distancias del punto problema al punto  $(i, j)$  en los ejes  $X$  e  $Y$  serán las siguientes:

$$d_X = x - \lfloor x \rfloor$$

$$d_Y = y - \lfloor y \rfloor$$

y el valor interpolado para el punto  $(x, y)$  es:

$$z_{x,y} = (1-d_X) \cdot (1-d_Y) \cdot z_{i,j} + d_X \cdot (1-d_Y) \cdot z_{i,j+1} + \\ + (1-d_X) \cdot d_Y \cdot z_{i+1,j} + d_X \cdot d_Y \cdot z_{i+1,j+1}$$

Finalmente, existe una tercera alternativa que agrupa una serie de métodos denominados habitualmente de interpolación cúbica. En estos métodos se utilizan los 16 datos del modelo más próximos al punto problema —distribuidos, por tanto, en una matriz de 4 filas y 4 columnas—. Suele aceptarse que los métodos cúbicos son más adecuados que los anteriores por su mejor adaptación a los datos reales, sin los truncamientos del primer método ni la suavización excesiva de la interpolación bilineal.

Los algoritmos cúbicos suelen aplicarse en dos fases secuenciales para estimar la altitud de un punto  $(x, y)$ . En la primera se realizan estimaciones independientes para las cuatro filas más próximas al punto problema:  $i-1, i, i+1$  e  $i+2$ , donde  $i = \lfloor y \rfloor$ . Para cada una de ellas se estima el valor de  $z$  en la abscisa  $x$  a partir de los valores de altitud de las columnas  $j-1, j, j+1, j+2$ , donde  $j = \lfloor x \rfloor$ . En la segunda fase se toman los cuatro valores de  $z$  obtenidos en la fase anterior y se realiza la estimación final para la ordenada  $y$ .

Para aplicar la interpolación se utiliza un conjunto de funciones de ponderación que define los pesos  $k$ , de cada dato. Por ejemplo, la expresión usada para la fila  $i$  tiene la forma siguiente:

$$z_{i,x} = k(d_{j-1}) \cdot z_{i,j-1} + k(d_j) \cdot z_{i,j} + k(d_{j+1}) \cdot z_{i,j+1} + k(d_{j+2}) \cdot z_{i,j+2}$$

Se han propuesto numerosas variantes en cuanto a los valores concretos de los pesos; por ejemplo, Park y Schowengerdt (1982), utilizan los siguientes:

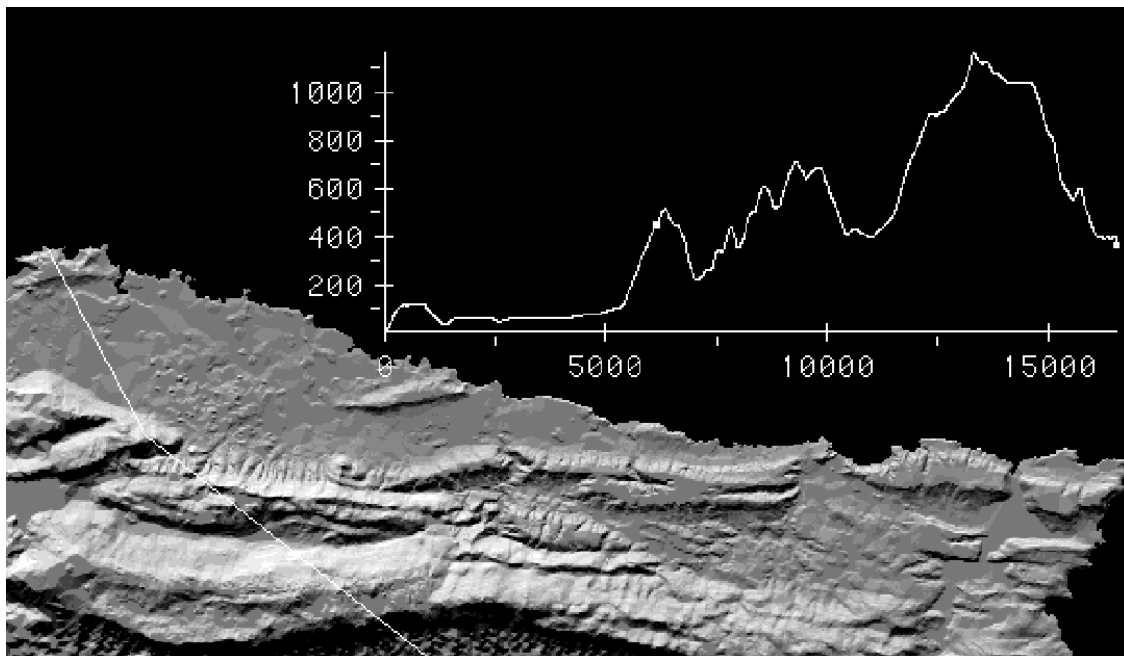
$$k(0 < |d| \leq 1) = 1 - \frac{1}{2} \cdot (5d^2 - 3|d|^3)$$
$$k(1 < |d| \leq 2) = \frac{1}{2} \cdot (4 - 8|d| + 5d^2 - |d|^3)$$
$$k(2 < |d|) = 0$$

En la bibliografía pueden encontrarse un buen número de métodos similares, donde cambian los valores de las funciones con el fin de conseguir resultados con características especiales como la conservación de la varianza o la eliminación de algunos problemas indeseables (Colwell, 1983:736; Erdas, 1991:163).

## Perfiles topográficos

La realización de perfiles topográficos es una aplicación de los algoritmos de interpolación presentados en el apartado anterior. El problema se descompone habitualmente en 4 pasos:

- se definen los puntos inicial y final del segmento rectilíneo sobre el que se levantará el perfil topográfico
- se fija el número de puntos del perfil —su resolución espacial—.
- se calculan las coordenadas (x, y) de cada punto del perfil
- se estima por interpolación la altitud z de cada punto



**Ejemplo del trazado de perfiles topográficos. El modelo de reflectancia corresponde a una zona de la marina oriental de Asturias (concejos de Llanes y Ribadedeva). La zona montañosa meridional es la Sierra de Cuera.**

El resultado es un vector de puntos con sus coordenadas (x, y, z). La generación de perfiles es una rutina imprescindible para solucionar el problema de la intervisibilidad que, esencialmente, trabaja sobre aquéllos.

## Intervisibilidad entre dos puntos

Formalmente, se define una función de intervisibilidad  $v$ , entre dos puntos  $P, Q$  que puede tomar dos valores:

$$v(P, Q) = \begin{cases} \text{cierto} & \text{si } P \text{ y } Q \text{ son mutuamente visibles} \\ \text{falso} & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La intervisibilidad se decide de acuerdo con la definición siguiente:

Dos puntos  $P$  y  $Q$  son mutuamente visibles si el segmento rectilíneo que los une o línea visual tiene siempre una altitud superior a la del terreno sobre su proyección, excepto en los propios puntos inicial y final,  $P$  y  $Q$

Por tanto, para el cálculo de la intervisibilidad entre dos puntos se proyectará la línea visual sobre el plano  $XY$  y se construirá el perfil topográfico definido por la proyección. Posteriormente, se analizarán los puntos intermedios para comprobar si su altitud es suficiente para interceptar la línea visual.

La intercepción de la línea visual por un punto depende de la altitud de dicho punto y de la correspondiente a la línea visual en el mismo lugar. El análisis puede realizarse de varias formas, entre las que se propone la siguiente:

- se calcula la pendiente de la línea visual —ángulo con respecto a la horizontal— desde el punto inicial  $P(0)$  al final  $P(n)$ :  $\text{tg } \psi$ , que depende de la diferencia de altitudes y la distancia entre los puntos:

$$\text{tg } \psi = (z_0 - z_n) / d_n$$

- para comprobar si un punto intercepta la visual, se calcula la pendiente entre el punto inicial y el punto problema,  $P(k)$  :

$$\text{tg } \psi_k = (z_0 - z_k) / d_k$$

- se comparan las pendientes: si  $\text{tg } \psi > \text{tg } \psi_k$  no existe intercepción, en caso contrario, el punto problema intercepta la línea visual y no existe intervisibilidad

El proceso anterior debe repetirse para cada uno de los puntos  $P(k)$  de la línea visual entre el inicial y el final:  $0 < k < n$ .

## Identificación de cuencas visuales

La generalización del análisis de intervisibilidad entre dos puntos permite la construcción de cuencas visuales.

La cuenca visual de un punto base o foco se define como el conjunto de puntos de un modelo con los cuales este punto base está conectado visualmente.

Es decir, una cuenca visual de un punto  $P$ ,  $C(P)$ , es el conjunto de los puntos del MDE que cumplen la condición de intervisibilidad:

$$C(P) = \{Q_j \mid v(P, Q_j) = \text{cierto}\}$$

La construcción de la cuenca visual de un punto es una labor de cálculo intensivo ya que implica la realización de numerosos análisis de intervisibilidad entre dos puntos.

El método más simple para la construcción de la cuenca visual de un punto es la realización del análisis para cada punto del modelo: se toma como punto inicial el foco o punto problema y se barre el modelo tomando trazando tantos perfiles como puntos existan. En este caso se consigue la máxima precisión ya que se realiza un análisis específico para cada punto, pero el tiempo de ejecución puede ser muy elevado y gran parte de los análisis son redundantes.

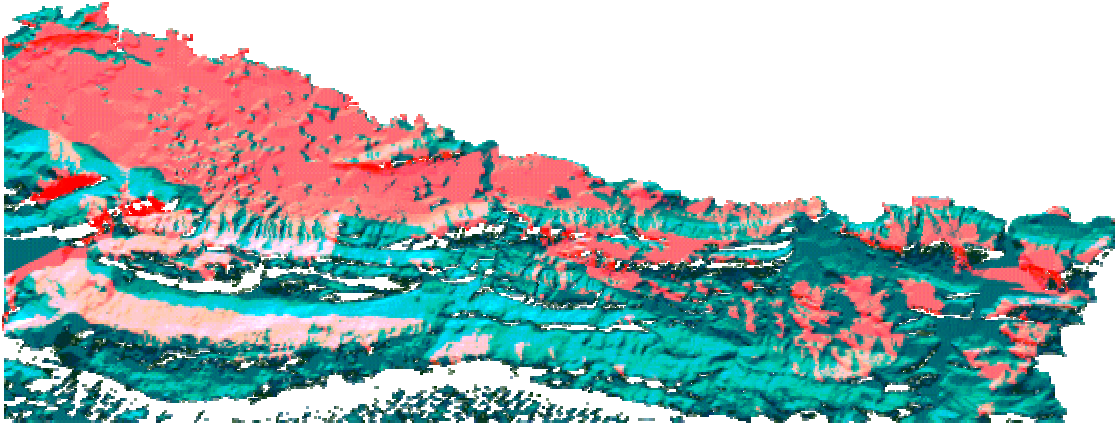
La conveniencia de reducir la complejidad de las operaciones recomienda reducir el coste informático limitando el área o la precisión de la búsqueda. La reducción del área puede realizarse de varias formas:

- definición de un radio de búsqueda alrededor del foco. Con el uso de esta opción se asume que una estructura, aunque pueda permanecer visible, se hace menos llamativa según aumenta la distancia. En el caso de análisis de impacto visual, esta distancia máxima puede definirse en función del ángulo de visión del objeto, que depende de su tamaño y de la distancia de mira.
- delimitación de los ángulos de búsqueda, bien en sentido vertical, horizontal o ambos. Por ejemplo, si estamos interesados en conocer la visibilidad de una estructura solamente en una dirección —por ejemplo, hacia una carretera que se acerca a la misma—, podremos limitar el análisis a un sector circular que incluya el trazado de la misma hasta una distancia determinada.

Otra aproximación diferente es la reducción de la precisión del análisis que, a su vez, puede realizarse de dos formas:

- reduciendo la resolución espacial del MDE, mediante remuestreo — usando un tamaño de celda más grande— o mediante la selección de una muestra de puntos más o menos distanciados.
- reduciendo la resolución angular del análisis, mediante el trazado perfiles radiales a intervalos angulares fijos: por ejemplo, un incremento de  $1^\circ$  genera 360 perfiles radiales al foco que, dentro de distancias moderadas, permitirán una visión rápida aunque aproximada de la extensión de la cuenca visual.

La generación de perfiles radiales plantea algunos problemas cuando se analizan los puntos más alejados del foco. En este caso, es frecuente la aparición de bandeados radiales debido a que la separación entre los perfiles llega a ser mayor que el espacio entre filas y columnas. Por este mismo motivo suelen aparecer puntos no analizados de carácter ambiguo que dificultan la valoración final.



#### **Análisis de la cobertura de un reemisor situado en la Sierra de Cuera (Asturias)**

El análisis de cuencas visuales puede utilizarse para la evaluación del impacto visual de actuaciones con efectos negativos sobre el paisaje. Es posible construir un modelo de visibilidad, donde cada punto tiene asignado un valor proporcional a la extensión de su cuenca visual. Un modelo de este tipo puede servir de base objetiva para la toma de decisiones ya que permite conocer y comparar con fiabilidad la incidencia visual de las alternativas existentes.

**FIN DEL CAPÍTULO**