

Influencia de las características iniciales de la superficie y la precipitación en la dimensión fractal del microrrelieve del suelo

Surface initial characteristics and rainfall influence on fractal dimension of soil microrelief

VIVAS MIRANDA, J. G. y PAZ GONZALEZ, A.

The complex behavior of soil surface microrelief and its evolution is difficult to quantify. Several empirical roughness indices and geostatistical procedures currently used have been found to be sensitive to describe roughness differences between surfaces and changes within a surface due to rainfall. Such indices are simple, quantitative and synthetic descriptors of the complex soil surface organization, though spatial indices provide some information about the association of main elements (biggest clods and aggregates) determining microrelief variations. Fractals are mathematical objects that show the same structure when examined at all possible scales. Fractal dimension, the basic parameter characterizing a fractal object, is a potential index to quantify soil microrelief characteristics and changes induced by rainfall energy. A high resolution non-contact laser profile meter was used to measure microtopography on two artificial soil surfaces, before and after simulated rainfall. The experimental surfaces were reconstructed from aggregates of a plough layer and were thought to simulate two types of natural seedbeds, rough and fine. The calculation of the fractal dimension was performed through a variational method, by a numerical algorithm based on the roughness around the local root mean square (RMS), which develops a straight line roughness (SLR). Plotting SLR values versus distance along a profile in a log-log scale results in a straight trend line over a limited range of distance, the slope of which is designed as Hurst exponent, related to the fractal dimension. Thus, the spatial organisation of the soil surface can be considered as a fractal structure over a finite range of scales. Mean values of the surface fractal dimension were 2.51 for the rough surface and the 2.72 for the fine one. The slow decrease of microrelief caused by surface sealing under rainfall was also described by the fractal index. This study showed that fractal analysis provides a relevant quantification of seedbed type and an assessment of microrelief changes in relation to rainfall amount.

Key words: roughness, fractal dimension, microrelief, spatial modelization

INTRODUCCION

La rugosidad de la superficie del suelo, parámetro utilizado habitualmente para evaluar el microrrelieve, se puede expresar cuantitativamente mediante diversos índices empíricos, como por ejemplo a partir de la desviación estándar de las alturas respecto a un nivel de referencia (rugosidad aleatoria, definida por ALLMARAS et al, 1967) o la relación entre la distancia real medida a lo largo de un perfil microtopográfico y la distancia más corta o distancia horizontal (BOIFFIN, 1984). Los índices empíricos presentan la desventaja de que no proporcionan una interpretación en términos físicos de la organización espacial de las medidas de altura, ni sobre el aspecto de los agregados o unidades estructurales de la superficie, de modo que dos superficies con unidades estructurales muy diferentes pueden tener la misma desviación estándar.

El microrrelieve de la superficie del suelo también ha sido caracterizado mediante herramientas geoestadísticas, lo que permite tipificar patrones de variación espacial mediante índices con base física como la pendiente límite y la diferencia límite, propuestos por LINDEN & Van DOREN (1986), tomando como base el análisis de los semivariogramas de primer orden. La utilización de parámetros deducidos del álgebra de Bool (CHADOEUF et al., 1989; GOULARD et al., 1994) para simular las características de la superficie del suelo, ha permitido reconstruir superficies tridimensionales similares a las medidas experimentalmente; en este caso la configuración de los agregados se intenta simular mediante esferas o elipsoides,

cuya distribución de diámetros se puede describir mediante una distribución de Poisson.

La medida de la longitud o perímetro de un perfil rugoso es un problema clásico de geometría fractal : depende de la longitud de la unidad de medida empleada, o lo que es lo mismo, de la escala de observación. Dicho en otras palabras, lo que se pretende es evaluar un objeto no rectilíneo, el perfil microtopográfico, a partir de medidas experimentales que solo proporcionan una distancia recta entre dos puntos. Cuanto más pequeña sea la distancia entre los sucesivos puntos de medida, mayor será la longitud estimada del perfil (GALLART & PARDINI, 1996). Las características de irregularidad del perfil o la superficie microtopográfica sugieren inmediatamente el uso de la geometría fractal para su estudio y modelización.

Fractal, un término acuñado por MANDELBROT (1975), quien transmite la idea de que la naturaleza se rige por procesos y genera formas de naturaleza fractal. En las ciencias de la naturaleza la irregularidad de sus formas, procesos y series de datos obtenidos de la observación es una constante. La geometría fractal ha puesto de manifiesto cómo procesos no lineales deterministas muy simples pueden producir una gran complejidad y también cómo procesos aleatorios pueden generar formas deterministas (IBÁÑEZ et al., 1995; MARTIN, 1995). En muchos casos ello ha permitido en gran parte la génesis de irregularidades que se creían fruto de la superposición de un gran número de factores aleatorios y, por tanto, solo abordables con las técnicas estadísticas clásicas.

El término fractal fue introducido para

definir aquellos objetos o fenómenos espaciales y/o temporales que son continuos pero no diferenciables y que exhiben correlaciones espaciales sobre muchas escalas. Una definición más estricta del término fractal podría consistir en «series de medidas en las cuales la dimensión de Hausdorff-Besicovitch excede la dimensión topológica» (BURROUGH, 1985). En la práctica, el análisis de la naturaleza fractal de un fenómeno se basa en el uso de algoritmos que comprueban sus características a diferentes escalas.

El parámetro básico para caracterizar a un objeto fractal es su dimensión, un concepto puramente geométrico. Los objetos no fractales llevan asociada a su estructura una dimensión topológica que viene dada por un número natural. Así, se dice que una curva tiene dimensión 1, una superficie tiene dimensión 2 y una región sólida del espacio tiene dimensión 3. Por contra, los fractales pueden tomar valores reales intermedios entre los enteros, dado que representan estructuras de transición entre curvas y superficies o superficies y regiones sólidas.

La geometría fractal ha progresado hasta llegar a desarrollar un aparato conceptual y metodológico muy importante. Hoy en día se habla de diversos tipos de fractales, tales como los fractales autosimilares, autoafines y los multifractales (KORVIN, 1992). El hecho de que las partes que componen un conjunto geométrico sean semejantes al total se expresa diciendo que el conjunto fractal es autosimilar; el concepto de **auto-similitud** se ilustra en la figura 1, en donde se aprecia la idea de invariabilidad de escala, es decir la independencia de la estruc-

tura geométrica respecto a la escala de observación.

En este trabajo se estudia la dimensión fractal del microrrelieve del suelo a partir de medidas de perfiles microtopográficos efectuadas con rugosímetro laser de alta resolución en superficies experimentales preparadas artificialmente en condiciones de laboratorio. Dichas superficies simulaban un lecho de siembra en el que se determinó el microrrelieve inicial, así como su evolución y degradación bajo lluvia simulada.

MATERIAL Y METODOS

El suelo estudiado es un Cambisol crómico, según la clasificación de la FAO, desarrollado sobre esquistos de Ordenes en la localidad de Mabegondo (La Coruña), cuyas características generales figuran en un trabajo anterior (GOMEZ SUAREZ, 1998; PAZ & TABOADA, 1996). La

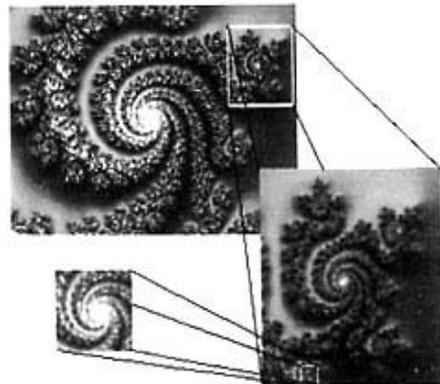


Fig. 1 En la parte superior se observa un objeto fractal, abajo a la derecha un detalle de ese objeto, abajo a la izquierda un detalle del detalle. Dado que un detalle ampliado es semejante al todo se dice que ese objeto presenta auto-similitud.

toma de muestra se efectuó en el horizonte de laboreo entre 0 y 20 cm

Se estudiaron dos superficies experimentales, que consistían en una capa de 5 cm de espesor máximo obtenidas por mezcla de agregados de distinto calibre, en proporciones que intentan reconstruir la estructura de lechos de siembra del suelo con diferente microrrelieve.

Las dos superficies estudiadas diferían en cuanto a la proporción de agregados de diferente calibre, sobre todo, los de mayores dimensiones. En la primera, más gruesa, es decir con mayores diferencias locales de microrrelieve, la proporción de agregados de 10 a 20 mm se cifraba en 15 % y la de agregados de 20 a 30 mm en un 10%; la segunda, relativamente más fina, carecía de unidades estructurales mayores de 10 mm. La preparación de estas capas artificiales se llevó a cabo en recipientes cuadrados de 58 cm x 58 cm sobre un lecho de arena fina.

Previamente a la preparación del lecho de siembra artificial, los agregados se humectaron lentamente por ascenso capilar, con objeto de reducir la microfisuración. Antes del inicio de la experiencia, el lecho artificial se llevó a saturación. En estas condiciones el principal mecanismo que contribuye a la desagregación es el impacto de las gotas de lluvia.

La formación artificial de lluvia se llevó a cabo mediante un simulador con una superficie de 1,30 m x 1,30 m que consta de 380 capilares, situados a 4,6 m de la superficie experimental. Las gotas homogéneas que se producen en los capilares caen sobre una red metálica en donde se fragmentan y dispersan, resultando una distribución aleatoria de tamaños. La intensidad de la lluvia aplicada fue de 30

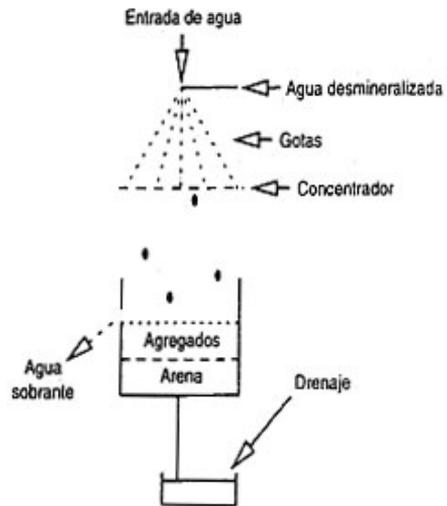


Fig. 2. Esquema del dispositivo experimental utilizado para determinar la evolución de la superficie del suelo bajo lluvia simulada.

mm/h. En la figura 2 se presenta un esquema del dispositivo experimental usado para la simulación de lluvia.

En la superficie gruesa se midió la microtopografía en siete ocasiones, el estado inicial y otros seis estadios de evolución, resultado de la aplicación de las siguientes cantidades acumuladas de lluvia, producida mediante simulador: 10, 55, 85, 130, 190 y 250 mm. En la superficie fina, la microtopografía se midió en cinco ocasiones, el estado inicial y cuatro estadios de evolución sucesivos, después de la aplicación de 7,5, 22,5 y 52,5 mm.

Durante el escaneado de cada superficie se obtenían 270 perfiles separados entre sí 2 mm y cada perfil individual, a su vez, constaba de más de 350 puntos de medida, efectuadas con un paso del

orden de 1,5 a 2 mm. El rugosímetro de rayos láser utilizado ha sido descrito previamente (BERTUZZI *et al.*, 1990). En esencia consta de una fuente y un receptor de Helio-Neon (He-Ne) de baja potencia y un sistema óptico acoplado que permite proyectar verticalmente un haz de rayos emitido normalmente a la superficie del suelo y tratar las imágenes desfocalizadas, que son reflejadas de modo que proporcionen medidas puntuales de microrrelieve. Este sistema facilita la eliminación de las interferencias entre la curvatura de los agregados y el ángulo del haz incidente, principal limitación de los rugosímetros clásicos. El error absoluto máximo de las medidas con el equipo utilizado es $< 0.25 \mu\text{m}$.

CONSIDERACIONES TEORICAS

Una descripción detallada de los métodos de determinación de la dimensión fractal de perfiles y superficies se puede encontrar en la bibliografía (MANDELBROT & WALLIS, 1969; FEDER, 1988). Dado que la metodología utilizada no es todavía muy conocida, a continuación se hará una breve revisión de los conceptos esenciales.

El fundamento del método de análisis de la microtopografía propuesto estriba en la idea de que la dimensión fractal es útil como indicador de la rugosidad de una curva, y así, cuanto mayor es la dimensión fractal, mayor es su longitud. Dado un fractal, se plantea el problema de medirlo, bien a dicho fractal como conjunto geométrico, o bien a alguna característica ligada a su estructura geométrica.

Considerando como objeto de estudio

fractal perfiles microtopográficos definidos por valores discretos de altura del microrrelieve, es necesario admitir las siguientes hipótesis:

1 – El conjunto discreto de puntos que componen un perfil es unívoco.

2 – La medida de una característica geométrica, como por ejemplo la desviación estándar de las alturas, efectuada sobre todo el perfil y en cualquier dirección del mismo, es aproximadamente igual en cualquier punto de este. Es decir el objeto fractal estudiado es homogéneo.

Admitiendo, además, que el método de medida utilizado para describir la geometría de un perfil depende solamente de la escala que se utiliza, se obtiene:

$$w = f(L)$$

donde, w es la medida y L la escala.

De tal modo que al llevar a cabo un cambio de la escala de medida (lo que equivale a multiplicar por un factor b_x), la función será modificada (por un factor b_y), lo que permite definir la siguiente regla de transformación de escala:

$$b_y w = f(b_x L) \quad (1)$$

donde w es una medida en la dirección y (ej. desviación estándar), L la escala y b_y y b_x los factores de escalamiento en las direcciones y y x , respectivamente.

Se puede deducir fácilmente que la función que satisface la relación de escala (1) es:

$$f(L) = L^H, \text{ o sea } w = L^H \quad (2)$$

Donde, el parámetro H se denomina exponente de Hurst, que viene dado por:

$$H = \frac{\ln(b_y)}{\ln(b_x)} \quad (3)$$

El exponente de Hurst, H , está directamente relacionado con la dimensión fractal. En el caso particular de que la medida utilizada para caracterizar el perfil, w , sea la desviación estándar, el exponente H y la dimensión fractal del perfil (D) se relacionan, de acuerdo con FEDER (1988) mediante la expresión:

$$D = 2 - H \quad (4)$$

A su vez, la dimensión fractal del perfil está relacionada con la dimensión fractal de la superficie formada por una serie de perfiles, (MANDELBROT, 1983) mediante:

$$D_{\text{superficie}} = D_{\text{perfil}} + 1 \quad (5)$$

Como se puede apreciar en las expresiones (3) y (4), el exponente H , o la dimensión fractal, D , están íntimamente relacionados con las características geométricas del perfil, sintetizando toda la información relacionada con su escalamiento.

La mayoría de los métodos existentes para el cálculo de la dimensión fractal se basan en el análisis de la relación entre diferentes factores de escala del perfil, de acuerdo con la expresión (3). Esta relación puede ser calculada a través de «medidas» de una característica en las diferentes direcciones del perfil, osea averiguando cómo será afectada una medida (Ej.: dis-

persión, variación entre máx. y mín., etc) en la dirección y en el caso en que se modifique la escala en la dirección x . Cada método de medida tiene su grado de precisión y su ámbito de aplicación; en la Tabla 1 se resumen algunos de los métodos más utilizados para estimar la dimensión fractal.

El método utilizado en este trabajo para calcular la dimensión fractal ha sido el propuesto por MOREIRA & KAMPHORST (1994), que consiste en una modificación del descrito en el apartado 7 de la Tabla 1. La diferencia estriba en que en lugar de la dispersión en torno a la media (desviación típica), se utiliza el valor medio de la dispersión en torno a la recta que mejor se ajusta a los puntos experimentales, dentro de la escala usada para el cálculo. El algoritmo utilizado se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{w}(l) = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \frac{1}{l} \sum_{j=1}^{[l]} [x_j - f(i)] \right\}^2 \quad (6)$$

Siendo $f(i)$ la función lineal que mejor se ajusta a los puntos del intervalo $[i, i+l]$, que a su vez seguirá la relación descrita en la sección 7 de la Tabla 1, de modo que:

$$W \propto l^H \quad (7)$$

De donde se infiere que el valor de H puede ser determinado por la pendiente del gráfico log-log (doble logarítmico) de W versus l .

Como sugiere la ecuación (3), el exponente H aporta información sobre la geometría del perfil analizado. Por ello se puede afirmar que la dimensión fractal, D ,

describe la características de ocupación del espacio, pudiendo asumir valores no enteros. Es decir, a medida que H disminuye, D se aproxima a 2, por lo que el perfil se vuelve tan tortuoso como si en realidad el espacio comenzase a ser ocupado a modo de un plano. De esta forma el exponente H es un índice excelente para la caracterización de perfiles rugosos, debido a su capacidad de identificar patrones de ocupación del espacio.

Otra característica importante del exponente H es la de informar sobre la persistencia, o no, del proceso estudiado (figura 3). De acuerdo con FEDER (1988) para $H > 1/2$ se aprecia persistencia; así un

incremento positivo en el pasado aumenta la posibilidad de un incremento positivo en el futuro. Para $H < 1/2$ ocurre antipersistencia, lo que indica que para un incremento positivo en el pasado, incrementos positivos en el futuro tendrán mayor probabilidad. El parámetro $H = 1/2$ caracteriza a un sistema no correlacionado, como es el caso del movimiento browniano.

En la figura 3 se puede observar un ejemplo de las tres posibilidades antes mencionadas. Trazando un gráfico de la distancia al origen versus tiempo para distintos valores del exponente de Hurst, H , se obtienen típicos ejemplos de la oscilación aleatoria de una variable.

TABLA 1. Relación de diversos métodos para estimación de la dimensión fractal.

METODO	RELACION	ESTIMACION
1. Longitud de segmento	$L(r) = Kr^{1-D}$ r = tamaño del segmento K = cte.	Gráfico $\text{Log}(L) - \text{Log}(r)$, donde la pendiente es $1-D$
2. Area/perímetro	$A = Kp^{2/D}$ A = Area estimada P = Perímetro estimado K = cte.	Gráfico $\text{Log}(A) - \text{Log}(p)$, donde la pendiente es $2/D$
3. "Box counting" funcional	$N(L) \sim L^{-D}$ $N(L)$ = Número de cubos de tamaño L	Gráfico $\text{Log}(N(L)) - \text{Log}(L)$, donde la pendiente es $-D$.
4. Variograma	$2\gamma(h) = h^{4-2D}$ h = intervalo de muestreo	Gráfico $\text{Log}(\gamma(h)) - \text{Log}(h)$, donde la pendiente es $4-2D$.
5. Espectro potencial	$P(\omega) = \omega^{-(5-2D)}$ $P(\omega)$ = Potencia ω = frecuencia	Gráfico $\text{Log}(P(\omega)) - \text{Log}(\omega)$, donde la pendiente es $-(5-2D)$.
6. Ley empírica de Korcak/Zipf para islas	$N(A > a) = Fa^{-(D/2)}$ $N(A > a)$ = N° de islas mayores que el tamaño a . F = cte.	Gráfico $\text{Log}(N(A > a)) - \text{Log}(a)$, donde la pendiente es $-D/2$.
7. Desviación típica.	$w(L) = FL^{(2-D)}$ $w(L)$ = Desviación típica a una escala L . F = cte.	Gráfico $\text{Log}(w(L)) - \text{Log}(L)$, donde la pendiente es $(2-D)$.

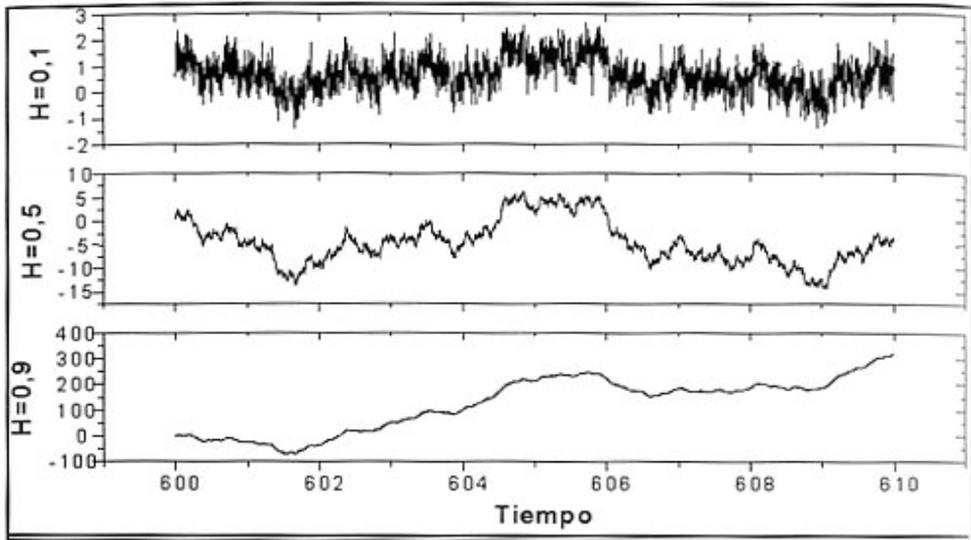


Fig. 3 Movimiento browniano fraccionario para diversos valores del exponente de Hurst. $H=0,5$ (superior), $H=0,7$ (centro) e $H=0,9$ (inferior).

Dependiendo de la persistencia o antipersistencia del objeto fractal o sistema estudiado, la medida representada a lo largo del eje y , en este caso la distancia al origen aumenta con mayor o menor intensidad. En particular, si en vez de la distancia al origen se representase la rugosidad se obtendrían resultados similares. Se comprueba de este modo que el exponente H mide simplemente la forma en que cambia la característica medida en el eje y (en este caso la longitud del perfil) al variar la escala en el eje x .

Para verificar la validez del método de cálculo empleado se suelen utilizar funciones teóricas o algoritmos que simulan superficies aleatorias con notable precisión, conocido el exponente de Hurst, H . A tal efecto se utilizó una función teórica, conocida como función de Weierstrass capaz de generar perfiles con un exponen-

te H determinado. En la Tabla 2 se comparan los valores teóricos de H frente a los que resultan de la aplicación de la función Weierstrass para crear perfiles.

Se comprueba, de este modo, que la diferencia relativa entre el valor teórico y

H Teórico	H Estimado
0,9	0,82(8)
0,5	0,47(4)
0,1	0,11(3)

TABLA 2. Comparación entre valores teóricos del exponente de Hurst, H , y los estimados mediante la función de Weierstrass.

el estimado tiende a ser mayor cuando éstos son extremos (cerca de 0 y de 1) que cuando son medianos (cerca de 0,5). Por otra parte, las diferencias entre los valores teóricos y estimados de H no se deben

exclusivamente a errores de «medida», sino que, al ser las diferencias sistemáticas, pueden ser atribuidos en gran parte a imprecisiones durante el proceso de generación de los perfiles teóricos

RESULTADOS Y DISCUSION

En el caso estudiado, se trata de perfiles de datos microtopográficos obtenidos mediante un sensor láser que realiza una medida de altura de la superficie del suelo a intervalos constantes de tiempo. Previo al tratamiento de los datos se examinó el aspecto de cada uno de los perfiles microtopográficos. En algunos perfiles experimentales se detectaron líneas verticales que destacaban sobre el relieve medio;

estas líneas son un artefacto creado cuando, circunstancialmente, el haz láser no retorna al sensor, al ser interceptado por irregularidades del microrrelieve. Para llevar a cabo los cálculos de la dimensión fractal se eliminaron estos artefactos del perfil.

Dividiendo la longitud del perfil entre el número total de lecturas efectuadas en el mismo, se obtiene un espaciado medio entre lecturas del orden de 1,5 mm. Para eliminar posibles efectos de borde debidos a salpicadura de las gotas de lluvia que impactaban sobre las paredes del recipiente experimental, se prescindió de las medidas de altura más externas. Por ello, los cálculos se efectuaron teniendo en cuenta

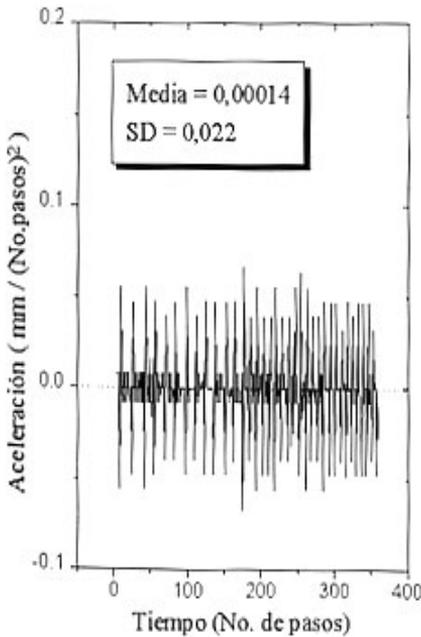


Fig. 4 Aceleración del desplazamiento mecánico del sensor, considerando que el intervalo de tiempo entre la toma de datos individuales es constante.

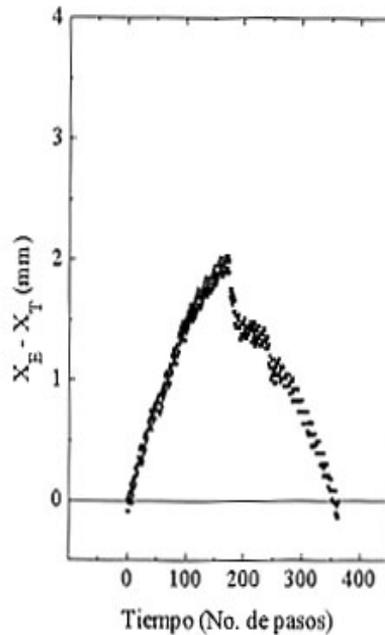


Fig. 5 Diferencia entre la posición real obtenida con el equipo laser utilizado, XE y la posición teórica XT, que resultaría de considerar la velocidad constante.

250 de los 270 perfiles medidos, es decir prescindiendo de los 10 perfiles más próximos a cada margen; del mismo modo únicamente se tuvieron en cuenta 330 medidas puntuales de altura en cada perfil, desechando, en consecuencia, los datos iniciales y finales en el entorno de los bordes.

Por otra parte, previo al análisis de la estructura fractal, es necesario comprobar la homogeneidad de las series de datos experimentales de altura medidos con sensor láser.

HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS

A pesar de las avanzadas prestaciones del equipo experimental utilizado y de que las medidas de microrrelieve se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio, se pudieron identificar diversos factores que causan cierta heterogeneidad de las series de datos, cuyos efectos y consecuencias sobre las medidas puntuales de altura conviene tener en cuenta al efectuar el análisis de las dichas series.

En primer lugar, se pudo comprobar que la velocidad instantánea con que se desplaza el sensor no es constante, sino que existen aceleraciones y deceleraciones de diversa intensidad, aunque la aceleración media es prácticamente nula. En efecto, en la figura 4 se representa la derivada segunda de la posición del sensor en función del número de pasos o puntos medidos a lo largo del perfil. Se observa que la aceleración media se cifra en $0,00014 \mu\text{m}/\text{paso}^2$, es decir $0,14 \text{ mm}/\text{paso}^2$, del mismo orden de magnitud que la resolución en altura del sensor. Sin embargo, se aprecia un ruido de fondo motivado por continuas aceleraciones y deceleraciones que aproxi-

madamente cada 10 pasos llegan a alcanzar valores máximos, del orden de 50 a $70 \mu\text{m}/\text{paso}^2$, por lo que la desviación estándar de la aceleración se cifra $22 \text{ mm}/\text{paso}^2$.

En consecuencia, se aprecia, que sobre la trayectoria del sensor, se ejerce una influencia típica de una fuerza externa, que provoca oscilaciones de la aceleración instantánea, aunque la velocidad media con que se desplaza el sensor tiende a mantenerse constante. Este efecto probablemente este motivado por las peculiaridades del motor paso a paso responsable del desplazamiento del sensor.

Otra evaluación de la precisión del equipo pueden observarse en la figura 5, en la que se representa la diferencia entre la posición real del sensor láser y la posición teórica, admitiendo que la aceleración es nula. Se aprecia mediante este tipo de representación que la diferencia entre la posición esperada y la real van creciendo desde el origen del perfil hasta el punto medio del mismo para disminuir en la segunda parte del trayecto y anularse de nuevo al final del mismo. En este caso la fuerza externa provoca primero un solo ciclo de aceleración seguido de una deceleración de tipo cuadrática en el tiempo. Estos resultados probablemente se deben a la deformación de la barra que sostiene el sensor mientras éste se desplaza, provocando un aumento de la velocidad hasta que el sensor alcanza el centro de la barra y una disminución posterior.

En definitiva, en la figura, 5 se comprueba que los puntos iniciales y finales del gráfico están cerca de cero, de forma que el efecto de la aceleración provocada por el motor paso a paso no se propaga en la barra. En consecuencia, solamente las

escalas menores de distancia, es decir, los puntos más próximos están sometidos a la influencia de la variación de la velocidad durante el desplazamiento del sensor a lo largo de la barra fija situada sobre la capa de agregados que simula un lecho de siembra.

Otras posibles fuentes de heterogeneidad, relacionadas con el dispositivo experimental utilizado, son ajenas a las prestaciones del sensor láser. Así, al preparar la superficie inicial se fueron depositando mezcladas las fracciones de agregados de menor calibre y se llevó a cabo una nivelación de las mismas; por último, los agregados de mayor tamaño se situaron al azar en la superficie del lecho artificial. A pesar del cuidadoso proceso de construcción de la superficie experimental, se puso en evidencia la presencia de una tendencia lineal de las medidas microtopografía, en las dos superficies estudiadas, la gruesa y la fina. Por ello el análisis de la estructura fractal se llevó a cabo para dos condiciones: a partir de los datos de microrrelieve medidos directamente con sensor láser y una vez retirada la tendencia de los mismos.

Finalmente, la distribución espacial de la intensidad, y en consecuencia la energía cinética, de la lluvia simulada, puede no ser totalmente uniforme, lo que podría originar cierta heterogeneidad durante la evolución de las superficies iniciales.

ANÁLISIS FRACTAL

Una vez efectuado el análisis crítico del método de medida y de la precisión de los datos de altura obtenidos, se lleva a cabo el estudio fractal del microrrelieve inicial de

las dos superficies experimentales y de la evolución de las mismas, inducida por la energía cinética de la lluvia.

En la figura 6 se puede observar, en representación doble logarítmica, la rugosidad fractal, estimada mediante $w(L)$, versus la escala L , cuya relación viene dada por la expresión (7), para el estadio inicial y sucesivos estadios de evolución de una de las superficies estudiadas, la más gruesa. La escala de distancias presenta diversos ordenes de magnitud, comprendidas dentro del rango [3, 250] cuando se expresan en pasos, lo que equivale, (considerando que la distancia media entre dos alturas del mismo perfil es de 1,5 mm), a una cifra que oscila entre 4,5 y 375 mm.

Se aprecia que como resultado de la representación doble logarítmica del valor de w , (calculado como el valor medio de la

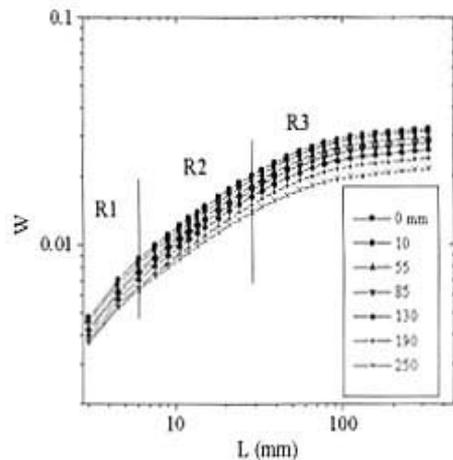


Fig. 6 Procedimiento para la segmentación de los rangos de escala (gráfico de W (rugosidad) versus escala para la superficie gruesa). R1 región afectada por imprecisiones del equipo, R3 número de muestras pequeño. R2 región de mayor seguridad.

dispersión en torno a la recta ajustada a los puntos experimentales dentro de cada intervalo de escala mediante el algoritmo consignado en la expresión (6)), versus la escala no se obtiene una pendiente uniforme en los sucesivos segmentos analizados. Destaca también el notable paralelismo de los valores de w hallados para los sucesivos estadios de evolución de la superficie a lo largo de los diferentes intervalos de medida. Se comprueba de este modo que la regresión lineal entre $\log(w)$ y $\log(L)$ está limitada a la parte central de la escala de medida utilizada y no se cumple ni para los intervalos de medida menores ni para los mayores.

En consecuencia se efectuó una partición de la escala en tres porciones, como se esquematiza en figura 7. Este tipo de representación permite visualizar para que rango de escalas se ajusta mejor la relación (7). Para intervalos de medida elevados, próximos ya a la longitud del perfil los resultados son menos precisos, debido al reducido número de datos experimentales puntuales con que se efectúan los cálculos. Para escalas inferiores a 6 mm, los resultados ponen en evidencia la falta de homogeneidad de los datos, que puede ser debida a la poca precisión del equipo utilizado en este intervalo de medida, como se discutió anteriormente. En consecuencia, el intervalo de medida o región que ofrece mayores garantías para determinar el exponente H se sitúa en la zona etiquetada como R2, comprendida entre 6 e 31,5 mm.

En la figura 7 se representa, para las dos superficies estudiadas, la gruesa y la fina, la relación lineal entre $\log(w)$ y $\log(L)$ en el intervalo de medida en el que se

asume que la estructura de la superficie presenta comportamiento fractal. Las rectas ajustadas a los datos experimentales presentaron coeficientes de correlación siempre superiores a 0,98. La pendiente de estas rectas de regresión, de acuerdo con las consideraciones teóricas antes expuestas, equivale al exponente de Hurst, H .

Los valores del exponente H y de su desviación típica calculados por regresión se presenta en la Tabla 3; en los cálculos se han tenido en cuenta todos los perfiles que forman una superficie, por lo que el exponente calculado se refiere a un perfil ideal que representa a cada estado de evolución. En esta tabla también se presentan el valor de la dimensión fractal de la superficie, calculado a partir del exponente de Hurst mediante las expresiones (4) y (5). Estos parámetros se han calculado tanto para los datos de altura iniciales, obtenidos directamente por escaneado mediante láser, como para los datos residuales, que resultan de filtrar la tendencia lineal observada en las superficies.

De la Tabla 3 se infiere, en primer lugar, la pequeña magnitud de los errores del exponente de Hurst, H , calculados a partir del error estándar de las rectas de regresión, que oscilan entre 0,007 y 0,009. En esta tabla también se comprueba que las diferencias entre los valores del exponente H con y sin filtrado de tendencia son prácticamente similares, y no difieren significativamente. Cabe mencionar que la diferencia máxima calculada para el exponente H entre las dos series de datos (0,004) es menor que el valor mínimo del error estándar de los ajustes por regresión (0,007).

El dato más revelador de la Tabla 3, sin embargo, es la importante diferencia entre las dos superficies, por lo que respecta a los parámetros exponente de Hurst, H, y dimensión fractal, D. Para la superficie gruesa y fina se obtuvieron respectivamente valores medios de H de 0,493 y 0,281 y valores medios de D de 2,51 y 2,72 para la fina.

En la superficie con agregados de mayores dimensiones el exponente de Hurst presenta inicialmente valores del orden de 0,5, lo que significa que a la escala de medida no hay correlación entre puntos vecinos; la distribución de frecuencias de las alturas sigue una distribución normal. Por contra, en la superficie más fina, que carece de agregados de diámetro supe-

rior a 10 mm, el valor de H indica una correlación negativa entre alturas de puntos próximos, es decir en esta superficie se observa antipersistencia. Por otra parte, al aumentar el intervalo de medida en la superficie más gruesa aumenta la diferencia de alturas, como cabe esperar de las notables diferencias de calibre entre los agregados de mayores y menores dimensiones; en la superficie fina, por contra, las diferencias de diámetro de los agregados son menos importantes, lo que se refleja en la menor pendiente de las rectas de ajuste de la figura 7.

En relación con las diferencias entre sucesivos estadios evolutivos de una misma superficie se aprecian una tendencia general a la disminución del valor del

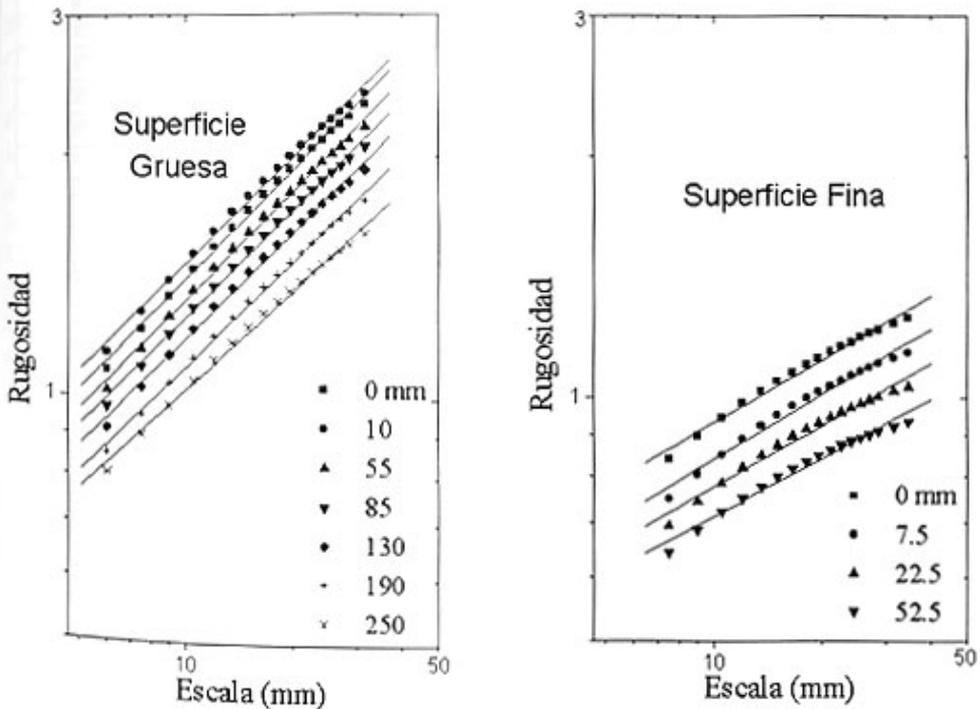


Fig. 7 Rugosidad fractal versus escala para las superficies iniciales y los sucesivos estadios de evolución inducidos mediante lluvia simulada.

TABLA 3. Resumen de los valores del exponente H, la desviación estandar del mismo y la dimensión fractal, D, para las dos superficies estudiadas, antes y después de se filtrar una tendencia lineal.

Superficie gruesa						
Lluvia (mm)	Datos iniciales			Filtrado de tendencia		
	H	D	SD	H	D	SD
0	0,509	2,491	0,008	0,509	2,491	0,008
10	0,497	2,503	0,008	0,496	2,504	0,008
55	0,504	2,496	0,008	0,504	2,496	0,008
85	0,500	2,500	0,008	0,499	2,501	0,008
130	0,494	2,506	0,008	0,492	2,508	0,008
190	0,485	2,515	0,007	0,484	2,516	0,007
250	0,459	2,541	0,008	0,457	2,543	0,008
Media	0,493	2,507		0,492	2,508	
Superficie fina						
Lluvia (mm)	Datos iniciales			Filtrado de tendencia		
	H	D	SD	H	D	SD
0	0,285	2,715	0,007	0,283	2,717	0,007
7,5	0,295	2,705	0,008	0,292	2,708	0,009
22,5	0,280	2,72	0,008	0,277	2,723	0,009
52,5	0,264	2,736	0,008	0,260	2,74	0,008
Media	0,281	2,719		0,278	2,722	

parámetro H (y un aumento de la dimensión fractal D) conforme aumenta la precipitación, según los datos de la Tabla 3 y la figura 8. En la superficie más gruesa, después de 250 mm de lluvia acumulada el exponente de Hurst es 0,05 unidades inferior al de la superficie inicial, lo que supone una disminución del 5%, mientras que en la superficie fina después de 52,5 mm de precipitación el valor de H es 0,021 unidades inferior al de la superficie inicial, con una disminución relativa del 2,1%. La variación más importante de la dimensión fractal ocurre en los estadios finales, mien-

tras que en los estadios iniciales de evolución se mantiene relativamente constante; de ello se deduce que con la cantidad de precipitación aportada las superficies se pueden encontrar todavía lejos del equilibrio.

En definitiva, la disminución del valor del exponente H en función de la lluvia, después de una etapa inicial relativamente estable, indica que este parámetro apunta a la posibilidad de la utilización del mismo para caracterización la evolución del microrrelieve de la superficie del suelo

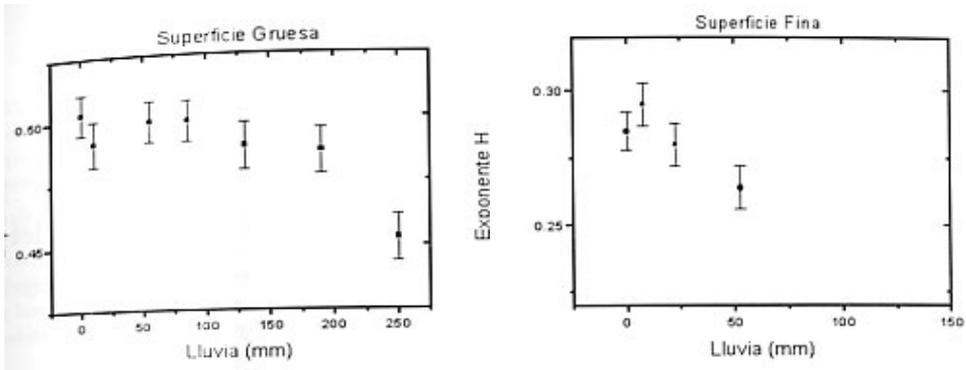


Fig. 8 Evolución del exponente H en función de la precipitación acumulada.

por acción de la energía cinética de la precipitación.

El valor del exponente H de la superficie más gruesa tiende a disminuir, conforme evoluciona el lecho de siembra, llegando a alcanzar valores que indican correlación negativa ($H < 1/2$) entre vecinos. Dado que en la superficie más fina el exponente H inicial ya presentaba valores menores que $1/2$ y continúa disminuyendo, se puede admitir una relación entre la tendencia a la reducción del exponente H y la dinámica de los agregados. De esta forma se puede admitir que por acción de la energía cinética del agua de lluvia disminuye el microrrelieve de los agregados de mayores dimensiones o, lo que es lo mismo, que las diferencias de altura entre puntos próximos tienden a reducirse.

CONCLUSIONES

Los datos de microrrelieve de la super-

ficie del suelo obtenidos mediante un equipo láser de alta resolución en dos superficies que simulaban un lecho de siembra presentan estructura fractal en el intervalo de medidas comprendido entre 6 y 31,5 mm.

A partir de medidas puntuales de altura de la superficie inicial y de sucesivos estadios de evolución de la misma bajo la acción de la lluvia, se obtuvo una dimensión fractal media de 2,507 para el lecho más grueso y 2,719 para el más fino.

Al disminuir el microrrelieve del suelo por acción del agua de lluvia tiende a aumentar el valor de la dimensión fractal del mismo.

Agradecimientos: Este trabajo se efectuó en el marco del Proyecto de la Unión Europea FAIR1/ CT95/ 0458.

BIBLIOGRAFIA

- ALLMARAS, R.R., BURWELL, R.E. y HOLT, R.F. (1967). Plow layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31, 550-556.
- BERTUZZI, P., CAUSSGNAC, J. M., STENGEL, P., MOREL, G., LORENDEAU, J. Y. and PELLOUX, G. (1990). An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Sci.*, 149:196-178.
- BOIFFIN, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse. Docteur-ingénieur, Paris INAPG. 320 pp+annexes.
- BURROUGH, P.A. (1985). Flakes, facsimiles and facts: Fractal models of geophysical phenomena. En: S. Nash (ed.), *Science and Uncertainty*. IBM Ltd. UK. pp 150-169.
- CHADOEUF, J., MONESTIEZ, P., BERTUZZI, P. and STENGEL, P., (1989). Parameter estimation in a Boolean model of rough surface: application to soil surfaces. *Acta Stereologica*, 8:635-640.
- FEDER, J., (1988) *Fractals*. Plenum Press. New York. 235 pp.
- GALLART, F. y PARDINI, G., (1996). PERFILRU: Un programa para el análisis de la rugosidad de perfiles microtopográficos mediante el estudio de la geometría fractal. En: *Grandal D'Anglade y Pagés Valcarlos, J., Eds. IV Reunión de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología*. O Castro (A Coruña). pp. 163-170.
- GOMEZ SUAREZ, M.J. (1998). *Análisis de la variabilidad espacial de las propiedades generales, elementos nutritivos y metales pesados en el suelo*. Tesis doctoral. Universidad de A Coruña. 273pp+anexos.
- GOULARD, M., CHADOEUF, J. and BERTUZZI, P. (1994). Random boolean functions: non-parametric estimation of the intensity. Application to soil surface roughness. *Statistics*, 25:123-136.
- IBAÑEZ, J.J., ALBA, S. de (1995). Aportaciones del caos a las ciencias de la tierra (estructura, evolución y dinámica del modelado terrestre). En: *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*, Geoforma ediciones. Logroño, 43-80.
- KORVIN, G. (1992). *Fractal models in the Earth science*. Elsevier, Netherlands. 396pp.
- LINDEN, D. R. and Van DOREN Jr., D. M. (1986). Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1550 - 1565.
- MANDELBROT, B.B. (1983). *The fractal geometry of nature*. Freeman, Ney York, 468pp.
- MANDELBROT, B.B., WALLIS, J.R. (1969). Some long-run properties of geophysical records. *Water Resources Res.*, 5: 321-340.
- MARTIN, M.M.A. (1995). Fractal y análisis fractal en las ciencias de la naturaleza. En: *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*. Geoforma ediciones. Logroño, 81-94.
- MOREIRA, J.G. and KAMPHORST LEAL DA SILVA, J. (1994). On the fractal dimension of profiles. *J. Phys. A*, vol. 27: 8079-8089.
- PAZ GONZALEZ, A. y TABOADA CASTRO, M. T. (1996). Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. *Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds. IV Reunión de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología*. O Castro (A Coruña). pp. 829-841.