

# ESTADO DE EQUILIBRIO MORFODINÁMICO: EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA NATURAL Y AMENAZA EROSIVA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE MONTAÑA

Francisco J. Fernando. A.  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Universidad de Chile

## RESUMEN

Las superficies emergidas están constituidas por un conjunto de cuencas hídricas coalescentes, por lo que configuran el campo de acción de la dinámica natural, dentro de la cual la tendencia de los procesos exógenos es rebajar toda forma sobresaliente de la superficie de equilibrio.

Para determinar esta dinámica se aplica el concepto de Estado de Equilibrio Morfodinámico y que corresponde a la confrontación y que se establece entre la Erosividad y la Erodabilidad.

La erosividad compromete tanto Eventos Detonantes como Energía de Posición, factor externo del Potencial de Energía Destructiva. Estos se relaciona en el Índice de Potencialidad Erosiva.

La Erodabilidad se define como la susceptibilidad o resistencia que ofrece la superficie a ser erosionada o degradada, y depende de factores internos. Respecto de estos, se hace necesario recurrir a variables claves que, por su carácter sintetizador, permiten asignar niveles de erodabilidad.

La confrontación de estas clases con los factores de la Erosividad permiten determinar el Estado de Equilibrio Morfodinámico, el cual se expresa en cinco categorías de Estabilidad, las que son definidas cualitativamente indicando su origen (causa) lo cual permite diseñar medidas adecuadas a implementar de acuerdo a cada situación o proyecto, así como evidenciar situaciones de riesgo.

## INTRODUCCIÓN

Sobre la base de que las superficies emergidas están constituidas por un conjunto de cuencas hidrográficas coalescentes, con diferentes manifestaciones y modalidades de escurrimiento, y que constituyen por lo tanto unidades geofuncionales básicas del medio físico, es evidente que éstas configuran el campo de acción de la dinámica natural que involucra procesos propios de la evolución incesante de nuestro planeta, cuyo fin último es tender al equilibrio en su sentido más amplio, y al suavizamiento de la topografía.

En este sentido, es claro que la tendencia natural de los procesos exógenos es rebajar o desgastar toda forma sobresaliente de la superficie de equilibrio, entendida ésta como aquella donde los procesos son incapaces de continuar su trabajo de erosión y transporte.

A este respecto, el concepto de Estado de Equilibrio Morfo-Dinámico (EEM) representa una condición de Steady State, y corresponde a la confrontación de fuerzas que se establece entre la Erosividad y la Erodabilidad:

$$\text{EEM} = \text{Erosividad vs. Erodabilidad}$$

El juego entre ambos conjuntos de procesos rige el modelado de la superficie terrestre, cuyas estructuras e irregularidades mayores son producto de fuerzas endógenas, cuya mecánica nos resulta por lo general imperceptible, exceptuando los períodos de crisis morfogenéticas.

## **EROSIVIDAD**

La Erosividad por una lado comprometo la acción de procesos externos y al energía erosiva de sus agentes, los que actúan como Eventos Denotantes (ED) (Intensidad de las precipitaciones, Sismos, Volcanismo, Calores Extremos, Deforestación, etc.), así como a la Energía de Posición (EP), la que involucra aspectos principales como Pendiente media, Compacidad de las Cuencas de Drenaje, Torrencialidad de los Cursos de Agua, y secundarios como Exposición con relación al Sol y Orientación respecto de la proveniencia de los frentes de lluvia y los vientos dominantes:

$$\text{Erosividad: ED} + \text{EP}$$

Algunos de estos aspectos, caracterizantes de comportamientos probables e incorporados al concepto de Energía de Posición, factor externo del Potencial de Energía Destructiva (González, 1992), se relacionan en el Índice de Potencialidad Erosiva (IPE) (Ferrando, 1991) de las siguientes manera:

$$\text{IPE} = \frac{\text{It} * \text{Ip}}{\text{Ic}} \quad \text{donde:}$$

It = índice de Torrencialidad,  
Ip = Índice de Pendiente Media, y  
Ic = Índice de Compacidad (Gravelius)

Respecto del cálculo de la Pendiente Media de cuencas hidrográficas u otra unidad espacial, se aplicó y comparó resultados de diferentes Índices (Ver gráfica N° 1), llegándose a la conclusión que el Índice de Finsterwalder, que relaciona la Equidistancia de la Isohipsas y la  $\Sigma$  del largo total de ellas con el Área, arroja resultados aceptables en relación a los otros índices, sin embargo, su cálculo es lento y requiere de una lata precisión.

Por ello, se creó y probó un Índice de Pendiente Media de fácil cálculo y que entrega resultados similares, descartando aquel que difiere en forma considerable de los otros (Índice de Pendiente del Rectángulo Equivalente).

Dicho índice relaciona la diferencia máxima de altura del sector o cuenca (H) (Maximun Basin Relief. Strahler, 1952) con el Lado Mayor del Rectángulo Equivalente (LMRE):

$$\text{Índice de Pendiente Media (\%)} = \frac{\mathbf{H \text{ (mts)}}}{\mathbf{LMRE \text{ (mts)}}} * 100 \text{ (FERRANDO, 1991)}$$

El valor en grados sexagesimales se obtiene multiplicando el valor de la pendiente en % por 0.45.

De este modo, reemplazando en la fórmula del IPE, se obtiene:

$$\mathbf{IPE = \frac{I_t (H/LMRE)}{I_c}}$$

Por su parte, el Índice de Torrencialidad se expresa como producto de la Frecuencia por la Densidad del Drenaje:

$$\mathbf{I_t = F_d * D_d.o}$$

$$\mathbf{I_t = \frac{N^\circ \text{ de Drenes} * \sum \text{Largo Drenes}}{(\text{Superficies})^2}}$$

Finalmente, El Índice de compacidad es una relación entre el Perímetro y el Área de las cuencas hídricas, y su base de referencia es el círculo, lo que genera una constante igual a 0,28. Los resultados pueden ser iguales o superiores a la unidad, indicando el valor 1 la máxima compacidad:

$$I_c = 0,28 \frac{P \text{ (km)}}{2\sqrt{A \text{ (km)}}}$$

En relación a estos Índices, es clara su incidencia en elementos de comportamiento hídrico, a saber:

- Mientras más cercano a la unidad resulte el Índice de Compacidad, menor será el Tiempo de Respuesta de una cuenca, y más marcado el peak de las crecidas.
- A mayor Índice de Torrencialidad, menor es el Tiempo de concentración resultante, lo que implica una mayor velocidad del flujo hídrico, hecho en el que además influye el valor de la pendiente media de la cuenca.

Ambas relaciones están ligadas estrechamente a aspectos de transporte de sedimentos, aumentando consecuencia la agresividad del, flujo de masa y energía.

Los Eventos detonantes por ser fenómenos que gatillan o disparan los procesos, tienen un carácter eventual, por lo que no es posible predimensionarlos y escasamente pronosticarlos. Por ello, a su respecto no se establecen relaciones y sólo se busca determinar el grado de Vulnerabilidad de formas y superficies ante su ocurrencia, así como establecer su probable reacción o comportamiento.

El concepto de Vulnerabilidad es directamente proporcional a la exposición al fenómeno, e inversamente proporcional a la resistencia a este (González, 1992) por lo que involucra aspectos tanto de Erosividad como de Erodabilidad.

## **ERODABILIDAD**

En este sentido, la Erodabilidad se define como la susceptibilidad o resistencia natural que ofrecen las distintas superficies o formas a ser erosionadas o degradadas (Ferrando, 1991) y por lo tanto, depende de una gran variedad de factores, principalmente internos.

Lo expuesto es coincidente con lo expresado por González (1992) al referirse a los factores generadores de Amenazas de Deslizamiento. Al respecto, se señalan factores internos como:

- Litología
- Meteorización
- Fracturamiento
- Morfología
- Vegetación
- Nivel Freático, y
- Drenaje superficial.

Por su parte, Mora y Vahrson (1992) incorporan como parámetros de la susceptibilidad:

- Las condiciones litológicas.
- La humedad usual del suelo, y
- El Relieve Relativo del terreno.

Respecto a este último parámetro, el cual también es denominado por los mismos como Rugosidad Natural del Terreno, se plantean una serie de interrogantes.

En primer lugar, la denominación Relieve Relativo, señalada por este autor como el cociente entre la diferencia máxima de altura y el área, difiere de la relación Relative Relife (Melton, 1957) ya que ésta considera como denominador el Perímetro.

El segundo lugar, al referirse a la misma relación como Rugosidad Natural, tampoco se corresponde ni con el Ruggendess Escabrosidad, y que resulta del producto del Maximun Basin Relief por la Densidad del Drenaje, no con la Textura Topográfica (Smith, 1950), que es una función logarítmica de la Densidad del Drenaje ( $\log Tt = 0,219649 + 1,115 \log Dd$ ).

Lo expuesto plantea una revisión de los criterios de Mora y Vahrson, 1992.

Por otro lado, considerando la Erodabilidad en el sentido de resistencia a la erosión, se establece relación estrecha con:

- El grado de facilidad que presentan las superficies y formas a ser rebajadas o entalladas, es decir, la resistencia a la disgregación y a la disolución.
- El grado de permeabilidad del terreno.
- La granulometría y espesor de los materiales de cubierta.
- El grado de exposición de la superficie en relación al Índice de Cobertura Vegetacional.

Algunos de estos factores plantean problemas de determinación, delimitación espacial y, en mayor medida, de dimensionamiento o cuantificación y de poderación.

Atendido lo señalado, se hace necesario recurrir a variables claves (válvulas) que por su carácter sintetizador permiten aproximar y asignar niveles de erodabilidad a unidades diferenciadas y delimitadas espacialmente.

A este respecto, se ha seleccionado los siguientes parámetros indicadores:

1. Intensidad (Densidad) de fallas, fracturas y ejes de pliegues.
2. Erosión geológica, entendida como grado de fragmentación derivado de su fase genética, y grado de alteración por procesos internos (fenómenos hidrotermales).
3. Promedio del producto de la Densidad por la Frecuencia del drenaje (Intensidad de la erosión lineal) <sup>1</sup>.
4. Densidad de movimiento en masa y gravitacionales por unidad de superficie, y
5. Grado de cobertura vegetal.

El orden en que se han mencionado estas variables claves obedecen una suerte de jerarquización cualitativa, en función de su peso o incidencia en la erodabilidad resultante según lo observado por el autor en su área de investigación.

Todas estas variables pueden ser cuantificadas a la vez que cartografiadas, de cuya superposición mecánica o automática (GIS) resultaran Clases de Erodabilidad Homogéneas con dimensión y localización espacial.

La confrontación de estas Clases de Erodabilidad así obtenidas, con los elementos del Potencial de Energía Destructiva permiten determinar el tipo de respuesta que pueden presentar las distintas cuencas hídricas diferenciadas (Perfil de Comportamiento), lo cual corresponde al Estado de Equilibrio Morfodinámico (EEM) que éstas manifiestan en las condiciones medio ambientales actualmente imperantes. Este EEM se expresa en cinco categorías de Estabilidad:

- Estable

---

<sup>1</sup> Si bien la Densidad (Dd) y la Frecuencia (Fd) del drenaje son indicadores de respuesta de una cuenca hídrica, es decir, componentes de la Erosividad, también estos parámetros son indicadores del grado de entallamiento o erosión lineal desarrollada sobre una superficie dada y, por lo tanto, se los puede asociar en un Indicador de Erodabilidad (IE) en base a la siguiente relación  $IE = \frac{1}{2} (Dd + Fd)$ .

- Moderadamente Estable
- Inestable
- Muy Inestable, y
- Inestabilidad Máxima.

Dichas categorías son definidas cualitativamente e indican las causas que determinaron su asignación, lo cual permite diseñar las medidas a implementar de acuerdo a cada situación u objetivos de cada proyecto de intervención, así como su localización.

## **CONCLUSIÓN**

Estos ámbitos espaciales, por su naturaleza sistémica, constituyen unidades adecuadas a la aplicación de medidas preventivas y/o correctivas, insertas en planes de manejo que busquen conciliar el aprovechamiento de los recursos con la mantención en el tiempo y el espacio de su calidad y cantidad (Ferrando, 1992). En este sentido, los resultados por este tipo de estudios constituyen un elemento básico fundamental en la selección y dimensionamiento de las obras a realizar, cualquier sea su objetivo (protección, prevención, aprovechamiento, etc.).

Los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología a nivel de microcuencas en uno de los componentes andinos de la Cuenca Hídrica del Río Mapocho (70° 18' W, y 33° 25' S), la Subcuenca del Río Molina, ha permitido determinar el EEM de cada una de ellas, y señalar que la divisoria donde se ha construido el más moderno complejo de deportes invernales (Valle Nevado), presenta en unas de sus vertientes un grado de Inestabilidad Máxima con los riesgos consiguientes, hecho que no fue advertido por los expertos franceses, los que seleccionaron el sitio sólo por las condiciones propicias de nieve y topografía. (Ver mapa anexo).

## **BIBLIOGRAFÍA**

CHRISTOFOLETTI, ANTONIO. 1969. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. En: Noticia Geomorfológica, vol. 9, n° 18, pp. 1-21, Dez. 1969. Depto. De Geografía, Universidade Católica de Campinas (SP), Brasil.

-----1976. Capacidade e Competencia no Transporte Fluvial. En: Bol. De Geografía Teórica, 6(11/12): 67-77. 1976. Río Claro (SP), Brasil.

FERRANDO A., F., 1990. Diagnóstico del Estado Morfodinámico: de Planes de Manejo de Cuencas Hidrográficas. En: Actas del XII Congreso de Geografía y II Jornadas de Cartografía Temática. Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 15 al 18 de Noviembre de 1990.

----- Et als. 1991. Diagnóstico de la Susceptibilidad a la Erosión de la Subcuenca del Río Mapocho, Chile. 90 pp., figs., maps. (Informe de Avance Proyecto FONDECYT 1000-91). (Abstract en: Primer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas/ F.A.O./C.E.P.A.L., Concepción, Chile.1990.

-----, 1991. Clasificación Hidrodinámica de Chile. En: anales del XIII Congreso Nacional de Geografía y IV Jornadas de Cartografía Temática. Universidad del Bío-Bío, Sede Chillán. Chillán, Chile. Noviembre de 1991.

-----, 1991. La Importancia Geográfica de los Ángulos de Confluencia en la Dinámica Fluvial: Caso Cuenca Andina Río Mapocho, Chile. En: Anais IV Simposio de Geografía Física Aplicada. Universidad Federal do Río Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 10-41 de Novembro de 1991. (Avance de Investigación).

-----, 1992. La Cuenca Andina del Río Mapocho, Evaluación de su Dinámica Natural y Riesgo Erosivo: Desarrollo Natural y Riesgo Erosivo: Desarrollo Metodológico. En: Memorias del I Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de Riesgos Naturales. ICAG. Bogotá, Colombia. 8 al 15 de Marzo de 1992.

-----, 1992. Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas: Proposición de Esquema Básico para Programa Nacional. En: Actas del II Congreso de Ciencias de La Tierra. Organizado por el Inst. Geográfico Militar,. Santiago, Chile. 17-21 de Agosto de 1992.

-----, 1992. Cuenca Andina del Río Ampoho: Análisis Hidromorfodinámico de las Variaciones de Pendiente de Drenes Involucrados en Confluencias Principales. Santiago, Chile. En: Actas de la 53<sup>a</sup> Semana de Geografía, Buenos aires, Argentina. Auspiciada por GAEA, Sociedad Argentina de Estudios Geográficas. 14-19 de Septiembre de 1992.

-----, 1992. Cuenca Andina del Río Mapoho: Relación del ángulo de Confluencia Horizontal con el Índice de sinuosidad en Torrentes de Montaña. Santiago, Chile. En: Actas de las VII Jornadas Cuyanas de Geografía. Universidad de Cuyo, Mendoza, Argentina. 30 de Sept. Al 3 de Octubre, 1992.

-----, 1992. Base para la Confección de Cartas de Erodabilidad. En: Anales del XIV Congreso Nacional de Geografía y V Jornadas de Cartografía Temática. Universidad de Talca, Talca, Chile. 4 al 7 de Noviembre de 1992.

GRANELL P., MARÍA., 1991. Sensibilidad Erosiva de Bacia do Río Padrino, RS.. En: Anais do IV Simposio de Geografía Física Aplicada. Universidade Federal do Río Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 10-14 de Noviembre de 1991.

GREGORY, K. J y WALLINE, D.E., 1973. Drainage Basin: Form and Process, A Geomorphological Approach. Ed. Edwars Arnold, London.

GONZÁLEZ G., A. J..1992. Avalanche Risk Evaluation al Utica. En: Memorias del I Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de Riesgos Naturales. ICAG. Bogotá, Colombia.

INGLE SMITH, D. Y STOPP, P., 1979. The River Basin: An Introduction to the Study of Hidrology. Ed. Cambridge University Press.

KIENHOLZ, H., 1992. The Cusntification of Vulnerabikity and Hazards. En: Memorias del I Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de Riesgos Naturales. ICAG. Bogotá, Colombia.

MELTON. MARK. 1958. Correlation Structure of Morphometric Properties of Drainage sistemas and their Controlling Agents. En: Journal of Geology, Vol. 66 (January-November).

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES. DIRECCIÓN MANEJO DE CUENCAS. 1977. Identificación de Microcuencas Prioritarias a través de la aplicación de 34 criterios (parámetros). Instructivo 1-2. Caracas. Venezuela.

MORA, C. S y VAHRSON. W. G.. 1992 Determinación "a priori" de la Amenaza de Deslizamientos utilizando Indicadores Morfodinámicos. En: Memorias del I Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de Riesgos Naturales. ICAG. Bogotá, Colombia.

ROCHE. M., 1963. Hidrologie de Surface. ORSTOM. Gauthuer-Villars Editeur. Paris. France.

SAINT-ONGE, D. A., 1968. Aplicacion de l' analyse de Horton a la Riviere Freeman, Alberta, Canada. En: Cahiers de Geographie. Año 12 # 27, pp. 445-450..

SCHUMM, S. A. y LICHTY, R.W., 1973. Tempo, Espaco e Causalidade em Geomorfología. En: Noticia Geomorfológica 13 (25): 43-62. 1973. Campinas (SP), Brasil.

SCHUMM, S.A., 1977. The Fluvial System. Ed.: John Wiley and Sons. New York.

STRAHLER, A.N., 1958. Dimensional Analysis Applied to Fluvially Eroded Ladforms. En: Geol. Soc. Of America Bull., Vol. 69, pp. 279-300.

VARGAS, R., J., 1992. Metodología para Estudios, Realización y Evaluación de Mapa de Riesgo Geológico y Zonificación Geotécnica. En: Memorias del I Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de Riesgos Naturales. ICAG. Bogotá, Colombia.

YOUNG, A., 1977. Slopes. Ed. Lomgman, London, Second Edition.



