



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-324

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

El vecindario hidrológico efectivo: una nueva forma de analizar la adyacencia

GIMÉNEZ FERNÁNDEZ, J. C.¹, BERTOMEU GARCÍA, M.¹ y DÍAZ BALTEIRO, L.²

¹ Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural. Universidad de Extremadura

² Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

La idea de limitar el tamaño de las cortas de regeneración ha sido ampliamente planteada en el campo de la planificación forestal, si bien hasta ahora no se había definido el “vecindario hidrológico” de una celda ni se había formulado un conjunto de restricciones hidrológicas a partir del análisis de las direcciones de flujo calculadas para cada celda.

Tradicionalmente, el tamaño de las cortas se ha limitado mediante los “modelos de restricción de unidades” (URM) o mediante los “modelos de restricción de superficie” (ARM). En ambos casos, el límite se establece de una manera arbitraria, independientemente de las características fisiográficas, impidiendo la corta simultánea de dos unidades adyacentes cualesquiera (URM) o impidiendo la corta de unidades adyacentes si la superficie total supera el valor máximo permitido (ARM), sin considerar que la problemática de unos rodales y otros puede ser distinta y que la superficie máxima a cortar podría ser distinta en cada uno de ellos.

En esta ponencia se presenta un nuevo concepto: el vecindario hidrológico efectivo, y se exponen sus bases físicas e hidrológicas y los algoritmos utilizados para su obtención y la generación de restricciones de adyacencia.

Palabras clave

Adyacencia, restricciones espaciales, erosión.

1. Introducción

Como es bien sabido, el objetivo último de la ordenación de un monte es que este cumpla plena y continuamente las funciones de producción, de protección y de recreo o uso social que se le hayan asignado previamente. A este respecto, uno de los problemas más analizado en el campo de la investigación operativa aplicada a la gestión de los recursos naturales es el problema de la programación de las cortas de regeneración de las masas forestales (*timber harvest scheduling problem*, en la literatura anglosajona) que, además de producir madera, deben satisfacer otros objetivos, tales como la provisión de un hábitat adecuado para determinadas especies de fauna, la conservación de la biodiversidad, la captura de carbono, etc. En algunas ocasiones, el tamaño de las cortas debe ser limitado para evitar determinados impactos, como por ejemplo, aquellos relacionados con la erosión hídrica. Esta idea ha sido ampliamente planteada en el campo de la planificación forestal (ROISE, 1990; TRETTIN, 1994; WEINTRAUB ET AL. 2000; SCHNORBUS Y ALILA, 2004), si bien hasta ahora no se había definido el “vecindario hidrológico” de una celda ni se había formulado un conjunto de restricciones hidrológicas para limitar el tamaño de las cortas a partir del análisis de las direcciones de flujo calculadas para cada celda.

2. Objetivos

En esta comunicación se pretende definir el vecindario hidrológico efectivo de una celda y evaluar su potencialidad para incorporar relaciones hidrológicas entre celdas al “tradicional” concepto de adyacencia. De esta manera se pretende poder incorporar el objetivo de control de la erosión en los modelos estratégicos de programación de cortas de regeneración.

3. Metodología

El objetivo de las restricciones hidrológicas en los modelos de programación de las cortas de regeneración es limitar el tamaño de las cortas para reducir el riesgo de erosión y asegurar, así, una mejor calidad del agua, el mantenimiento de la productividad del sistema a largo plazo, etc. En definitiva, se pretende que las variables de decisión tengan un límite definido para cada rodal en función de sus características topográficas. Para ello, es necesario analizar la conectividad hidrológica a nivel de celda mediante Sistemas de Información Geográfica, y definir el concepto de “vecindario hidrológico efectivo” de una celda: *conjunto de celdas adyacentes que están conectadas hidrológicamente con ella a través de flujos significativos*, esto es, flujos capaces de desencadenar procesos erosivos al superar un determinado “umbral erosivo” (calculado, por ejemplo, a partir del factor topográfico LS de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo -USLE-). De esta manera, se identifican las celdas que pertenecen al vecindario hidrológico de una celda dada y que, por lo tanto, no conviene cortar a la vez que esta.

El tamaño de las cortas se ha limitado tradicionalmente de una forma poco elaborada, tanto mediante los “modelos de restricción de unidades” (URM) como mediante los “modelos de restricción de superficie” (ARM) (MURRAY, 1999). En ambos casos, el tamaño de las cortas se establece de una manera arbitraria y se impone impidiendo la corta simultánea de dos unidades adyacentes cualesquiera (URM) o impidiendo la corta de unidades adyacentes en un mismo período si la superficie total supera un valor máximo permitido (ARM), sin considerar que la problemática de unos rodales y otros puede ser distinta y sin asumir, al menos en principio, que el límite pueda ser distinto en cada uno de ellos. Así, por lo general, se establece un límite común para todos los rodales, independientemente de sus características fisiográficas, y dicho límite se establece “externamente” (a priori) a través de la opinión de un experto o aplicando recomendaciones generales establecidas en los denominados Manuales de Buenas Prácticas de Gestión (AUST Y BLINN, 2004).

Una mejora sencilla de implementar sería establecer un límite diferente para cada uno de los rodales en función de sus características fisiográficas, como por ejemplo su pendiente media. Sin embargo, el método propuesto en esta comunicación plantea incorporar este tipo de restricciones a partir del análisis de la conectividad hidrológica a nivel de celda mediante un Sistema de Información Geográfica, a partir del concepto de vecindario hidrológico de una celda. A diferencia del vecindario espacial comúnmente utilizado, el vecindario hidrológico incluye únicamente aquellas celdas adyacentes “conectadas hidrológicamente” con la celda central. Así, mientras el vecindario espacial incluye siempre las ocho celdas vecinas, el vecindario hidrológico podrá incluir un número variable de dichas celdas, dependiendo de la topografía local y, por lo tanto, de la conectividad hidrológica de las celdas (Figura 1).

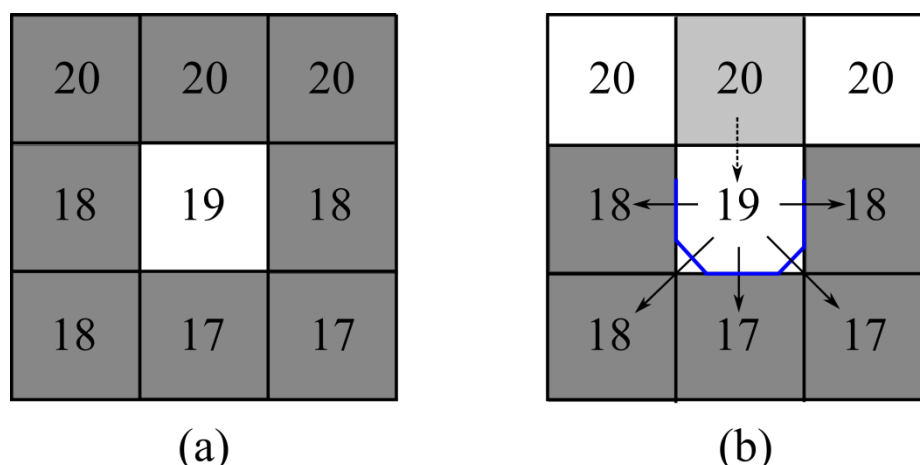


Figura 1. **Vecindario espacial (a) vs. Vecindario hidrológico (b)**. El número en cada celda indica la cota en el centro de la misma. Se han diferenciado las celdas aguas arriba (sombreado claro) y las celdas aguas abajo de la celda central (sombreado oscuro) y se han señalado mediante flechas las direcciones que podría seguir el flujo.

Dependiendo de la metodología utilizada, el número de celdas del vecindario hidrológico variará. Es decir, entre el algoritmo D8 (Deterministic 8), en el que únicamente se tienen en cuenta las direcciones dominantes de flujo y en el que el vecindario hidrológico puede reducirse a una o dos celdas –una aguas arriba y otra aguas abajo– (O’CALLAGHAN Y MARK, 1984), y los algoritmos de tipo MFD (Multiple Flow Direction), que calculan múltiples direcciones de flujo, en los que el vecindario hidrológico puede llegar a contener las ocho celdas adyacentes (WOLOCK Y MCCABE, 1995), existen planteamientos intermedios. Así, para la aplicación práctica en el contexto de esta comunicación se ha decidido utilizar una metodología del tipo MFD que reparte el flujo únicamente entre las dos celdas más próximas a la dirección de la máxima pendiente de manera inversamente proporcional al ángulo que forma el vector de unión de la celda y el de la máxima pendiente. De esta manera, todo el flujo saliente de una celda se repartirá entre las dos celdas de aguas abajo que más próximas estén a la dirección de la máxima pendiente.

Teniendo en cuenta esto, y analizando en profundidad el comportamiento hidrológico del flujo, se observa que pueden existir celdas pertenecientes al vecindario hidrológico “débilmente conectadas” con la celda central. Para analizar este extremo, se ha utilizado, a modo de umbral, el factor LS, calculado como una combinación de la pendiente y la acumulación de flujo (MOORE Y BURCH, 1986), para eliminar o descartar determinadas celdas del vecindario hidrológico. La idea que subyace tras este planteamiento es que aunque dos celdas estén conectadas hidrológicamente (exista una línea de flujo que conecta ambas), la escorrentía circulante puede no ser suficiente para generar problemas erosivos, bien porque la cantidad de flujo es escasa (escasa acumulación de flujo), bien porque la pendiente es pequeña, bien por una combinación de ambos factores. Dicho de otra manera, asumimos que los fenómenos erosivos aparecen allí donde estas variables toman valores elevados (fuertes pendientes, gran acumulación de flujo...), y esto ha sido tenido en cuenta en el cálculo del vecindario hidrológico: para que una celda pertenezca al vecindario hidrológico *efectivo* de otra es necesario superar un cierto umbral del parámetro LS a partir del cual se asume que pueden desencadenarse los procesos erosivos (si se dan las condiciones necesarias). La Figura 2 ilustra la idea explicada. Las celdas sombreadas tienen valores del factor LS superiores al umbral (y por lo tanto pertenecen al vecindario hidrológico de la celda central), mientras que las celdas

conectadas con flechas discontinuas tienen valores inferiores (y por lo tanto no forman parte del vecindario hidrológico).

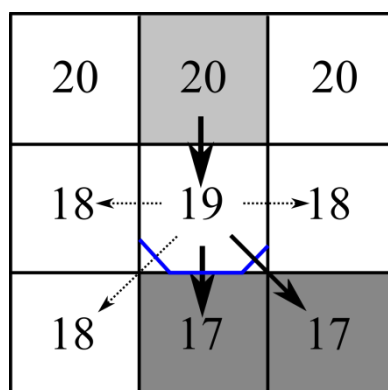


Figura 4.7. **Celdas del vecindario hidrológico efectivo** (con una escorrentía suficiente capaz de generar erosión). Las flechas continuas representan flujos significativos, y las discontinuas, flujos poco significativos al no superar el "umbral" del factor LS.

Para la aplicación práctica de esta metodología se ha utilizado un umbral para el factor $LS = 1$, si bien debería realizarse un estudio en profundidad para elegir el valor más adecuado, aunque este análisis se escapa a los objetivos de esta comunicación. Así, el algoritmo creado para el cálculo automático del vecindario hidrológico efectivo permite modificar el umbral del factor LS a utilizar en los cálculos.

Por último, para calcular el vecindario hidrológico efectivo de cada celda también se ha considerado la existencia de barreras físicas a la escorrentía, en concreto, las que aparecen como consecuencia de la red viaria, pues las cunetas canalizan las escorrentías y rompen la conectividad hidrológica de las celdas que, debido a la disponibilidad de datos, ha sido calculada únicamente a partir de datos topográficos.

Para determinar el vecindario hidrológico efectivo a nivel de celda, en el Sistema de Información Geográfica (QGIS 2.6) se parte de las capas de rodales (con los límites físicos y la red viaria), el Modelo Digital de Elevaciones (con las cotas para cada celda), la acumulación de flujo (con los valores de área acumulada obtenidos a partir de un análisis de las direcciones de flujo) y las orientaciones (con la dirección de la máxima pendiente). Para cada celda se calculan las pendientes a las ocho celdas vecinas y se distribuye el flujo acumulado en dicha celda (calculado previamente utilizando algoritmos del tipo MFD) según lo propuesto por TARBOTON (1997): el flujo se reparte entre las dos celdas sobre las que se sitúa el vector que define la dirección de flujo de manera proporcional, teniendo en cuenta el ángulo del vector y el ángulo correspondiente a cada una de las dos celdas, recibiendo más cantidad de flujo la celda más próxima a la máxima pendiente, y menos, la más alejada de esta. Posteriormente, para cada una de estas dos celdas del vecindario hidrológico se calcula el factor LS (MOORE Y BURCH, 1986), determinando además si existen vías que "corten" el flujo, pues, como se ha dicho, la existencia de este tipo de barreras "separa" celdas que, si sólo se tiene en cuenta el Modelo Digital de Elevaciones, parecería que están conectadas. La fórmula propuesta para el cálculo del factor LS por MOORE Y BURCH (1986) es:

$$LS = 1,4 \cdot \left(\frac{AF}{22,13} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\text{sen } \beta}{0,0896} \right)^{1,3}$$

Donde AF representa la “acumulación de flujo” y β denota el ángulo de la pendiente.

4. Resultados y discusión

El objetivo de esta comunicación es presentar el concepto de *vecindario hidrológico efectivo* sin entrar en ejemplos concretos de su aplicación; se pretende definir un nuevo concepto y plantear cómo puede ser calculado. Aunque no tiene relación con esta comunicación, se ha podido constatar la viabilidad de su aplicación a montes concretos de más de 180 hectáreas en los que ha sido necesario analizar más de 3000 celdas y generar alrededor de 1000 restricciones adicionales para el modelo de programación matemática de las cortas. Para esta aplicación concreta se ha desarrollado un algoritmo dentro de un Sistema de Información Geográfica (QGis) que realiza todos los cálculos matemáticos y genera las restricciones necesarias de forma eficiente analizando en cada año únicamente aquellos rodales que están en edad de ser cortados y generando, por lo tanto, menor número de restricciones. Como decimos, el objetivo de esta comunicación no es el modelo matemático resultante, sino el concepto de vecindario hidrológico efectivo y el procedimiento que puede emplearse para su obtención.

5. Conclusiones

El concepto de “vecindario hidrológico efectivo” de una celda definido en esta comunicación permite analizar las relaciones hidrológicas entre celdas adyacentes a partir del análisis topográfico y las direcciones de flujo resultantes. El análisis agregado de los vecindarios hidrológicos de las celdas a nivel de rodal permite además generar un conjunto de restricciones con el fin de limitar el tamaño de las cortas y mitigar sus potenciales problemas (emisión de sedimentos, disminución de la calidad del agua en los cauces, etc.). La incorporación de este tipo de restricciones en los modelos estratégicos de programación de las cortas se ha demostrado eficaz y necesaria como paso previo a la formulación de un modelo táctico.

6. Bibliografía

AUST, W. M., BLINN, C. R. (2004). Forestry best management practices for timber harvesting and site preparation in the eastern United States: An overview of water quality and productivity research during the past 20 years (1982-2002). *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 4(1): 5-36.

MOORE, I.D., BURCH, G.J. (1986). Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1294-1298.

MURRAY, A. T. (1999). Spatial restrictions in harvest scheduling. *Forest Science* 45(1): 45-52.

O'CALLAGHAN, J. F., MARK, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28(3): 323-344.

ROISE, J. P. (1990). Multicriteria nonlinear programming for optimal spatial allocation of stands. *Forest Science* 36: 487-501.

TARBOTON, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33(2): 309-319.

SCHNORBUS, M., ALILA, Y. (2004). Forest harvesting impacts on the peak flow regime in the Columbia Mountains of southeastern British Columbia: An investigation using long-term numerical modeling. *Water Resources Research* 40(5): 1-16.

TRETTIN, C. (1994). Hydrologic response of northern wetlands to silvicultural water management systems. En: *Water Management in Forested Wetlands*. Technical Report. USDA Forest Service, U.S. Environmental Protection Agency, p. 158.

WEINTRAUB, A., EPSTEIN, R., MURPHY, G., MANLEY, B. (2000). The impact of environmental constraints on short term harvesting: Use of planning tools and mathematical models. *Annals of Operations Research* 95: 41-66.

WOLOCK, D. M., MCCABE, G. J. JR. (1995). Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL. *Water Resources Research* 31(5): 1315-1324.