

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE LOS PUNTOS DE MAYOR VISIBILIDAD COMBINADA

JOAQUÍN MÁRQUEZ PÉREZ

Dpto. de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla,
c/ María de Padilla s/n, 41004, Sevilla, España

jmarper@us.es

RESUMEN

Conocer la ubicación del punto que posee la mayor cuenca visual sobre un área suele requerir la elección de una serie de localizaciones candidatas y el cálculo de su visibilidad. Si se contempla la posibilidad de considerar conjuntos de puntos candidatos y maximizar la superficie visible minimizando su número, la labor tiene un elevado coste de tiempo. En este artículo se presenta una metodología para afrontar estas cuestiones de una forma simplificada, basada en el programa *ArcGIS* y aplicada a las torres de vigilancia de incendios de la comarca de Albarracín (Teruel, España). La discretización de la superficie topográfica representada por un MDE a partir de la elección de puntos de alta visibilidad y puntos a observar, la generación de líneas de intervisibilidad positiva que los conecten y su integración en un modelo de redes permite la aplicación de métodos de localización y asignación óptima. Como resultado es posible conocer la ubicación de los puntos de mayor visibilidad combinada.

Palabras clave: torres de vigilancia, cuenca visual, intervisibilidad, análisis de redes, localización óptima, MDE.

OPTIMAL LOCATION OF POINTS SET MAXIMIZING AREAL VISIBILITY

ABSTRACT

Knowing the location of the point that has the largest viewshed over an area usually requires choosing a set of candidate locations and the calculation of its visibility. If we contemplate the possibility of considering sets of candidate points and maximizing the visible surface minimizing their number, the work has a high cost of time. This paper presents a methodology to address these issues in a simplified form, based on *ArcGIS* program, and applied to the fire lookout towers in the region of Albarracín (Teruel, Spain). The discretization of the topographic surface represented by a DEM from the choice of points of high visibility and points to note, generating

positive intervisibility lines that link them, and their integration into a network model, allows the application of methods of locating and optimal allocation, as a result it is possible to know the location of the points of combined higher visibility.

Keywords: watchtowers, visual basin, intervisibility, network analysis, optimal location, DEM.

1. Introducción y objetivos

Conocer la localización de los puntos de mayor visibilidad sobre una zona no es una cuestión fácil de resolver, debido a que deberían examinarse las cuencas visuales de cada una de las ubicaciones candidatas. El uso de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) facilita esta labor, pues transforma una superficie continua (la altimétrica) en otra discreta (el modelo), a partir de la cual ya es posible, al menos, averiguar el número máximo de operaciones necesario para calcular el punto de mayor visibilidad.

El número de celdillas a considerar en un análisis de visibilidad se relaciona directamente tanto con el tamaño de la zona a estudiar como con la resolución espacial empleada: (i) la extensión de la zona a analizar depende de la longitud del radio de visibilidad, que puede llegar a decenas de kilómetros; (ii) el tamaño de celdilla en zonas de fuerte relieve (donde suelen concentrarse este tipo de análisis) debe ser inferior al de otras zonas de menor variabilidad altimétrica, pues permite equiparar la calidad del MDE (Evans, 1972; Wood, 1996; Gao, 1997). Ambos factores suponen trabajar con modelos que cubren una gran superficie, formados por celdillas de pequeño tamaño, por lo que el número de celdillas a examinar puede llegar a ser enorme.

Para hacer este proceso más dinámico la cuestión clave es la reducción del número de celdillas. Si se considera el MDE como la población que contiene tanto los puntos de mayor visibilidad como los puntos visibles desde ellos, es posible generar dos muestras que la representen: una de ellas contendría las localizaciones que poseen una mayor probabilidad de ser puntos de alta visibilidad, mientras que la segunda integraría una muestra aleatoria de todos los puntos a observar. Del número y representatividad de estas muestras dependería el resultado final del análisis de visibilidad. Esta reducción posibilita minimizar el número de cálculos a efectuar para conocer los puntos que mayor visibilidad tienen sobre un territorio; sin embargo, del tamaño y representatividad de las muestras dependerá el resultado final del análisis.

La elección de la mejor combinación de puntos de alta visibilidad requiere un paso más: el empleo de métodos de localización y asignación óptima. Cuando se desea analizar las posibilidades de emplazamiento para una actividad determinada se recurre a modelos de localización y asignación óptima que, mediante algoritmos heurísticos, seleccionan de entre un conjunto de localizaciones candidatas (oferta) aquéllas que de una forma óptima pueden abastecer a otro conjunto de localizaciones que representan a la demanda. Existe una gran variedad de métodos de localización y asignación óptima, desde los que posibilitan seleccionar el mínimo conjunto de servicios para abastecer a una demanda, hasta aquellos que, conociendo el número de servicios a implantar, seleccionan localizaciones que minimicen el coste de alcanzarlas.

En este trabajo se presenta una metodología destinada a afrontar el problema de la localización de los puntos que poseen una mayor visibilidad sobre el territorio que los circunda, y que posibilite la realización de distintos tipos de combinaciones para alcanzar cuencas visuales que cumplan determinados criterios. En concreto, se trata de analizar las relaciones de intervisibilidad existentes entre las 10 torres de detección de incendios situadas en la Sierra de Albarracín (Teruel) y zonas en las que un incendio forestal puede tener lugar, con la idea de realizar propuestas que aumenten la eficacia de la red de vigilancia.

El objetivo general del artículo es la generación de una red de líneas de visibilidad positiva a la que poder aplicar métodos de localización óptima. Objetivos más específicos son: (i) la elección de los puntos de mayor visibilidad en el área de estudio; (ii) la localización óptima de 10 torres para la vigilancia de incendios; (iii) el establecimiento de 5 nuevas torres de vigilancia, considerando las 10 existentes; (iv) la ubicación del mínimo número de torres necesario para visualizar la mayor extensión posible del área de estudio. Un último objetivo, comparar los resultados obtenidos con los proporcionados por un método clásico en esta materia, permitirá contrastar la calidad de la propuesta.

A continuación se exponen los principales apartados de este trabajo: (i) Área de estudio y datos empleados; (ii) Antecedentes; (iii) Metodología; (iv) Resultados; (v) Comparación con otros métodos; (vi) Discusión; (vii) Conclusiones y (viii) Bibliografía.

2. Área de estudio y datos empleados

Los datos utilizados en este trabajo están referidos a la comarca Sierra de Albarracín, localizada al suroeste de la provincia de Teruel (España) y que limita en su parte oeste con las provincias castellano-manchegas de Guadalajara y Cuenca. La comarca presenta un terreno dominado principalmente por bosques de coníferas, matorral boscoso de transición, matorral esclerófilo, y tierras de labor en secano; los espacios con vegetación escasa o nula son solo testimoniales.

El área de estudio es algo más amplia que la comarca de Albarracín y la rodea formando un rectángulo que dista 2 km. de su perímetro; su superficie abarca algo más de 3.000 km² y en su interior se encuentran 10 torres de observación visual para la vigilancia de incendios, oscilando sus alturas entre los 14 y 19 metros (véase figura 1).

Los datos relativos a los análisis de visibilidad fueron proporcionados por el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón (2012): (i) MDE, de 20 m de resolución espacial, y (ii) localización de las 10 torres de vigilancia de la zona. La caracterización de los usos del suelo se llevó a cabo a partir de los usos del suelo definidos en el *Corine Land Cover 2006*. Toda la información espacial viene dada en el Sistema de Referencia de Coordenadas ED 50, UTM Zona 30 N.

Márquez Pérez, J. (2013): "Localización óptima de los puntos de mayor visibilidad combinada" *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-1, p. 195-219. ISSN: 1578-5157

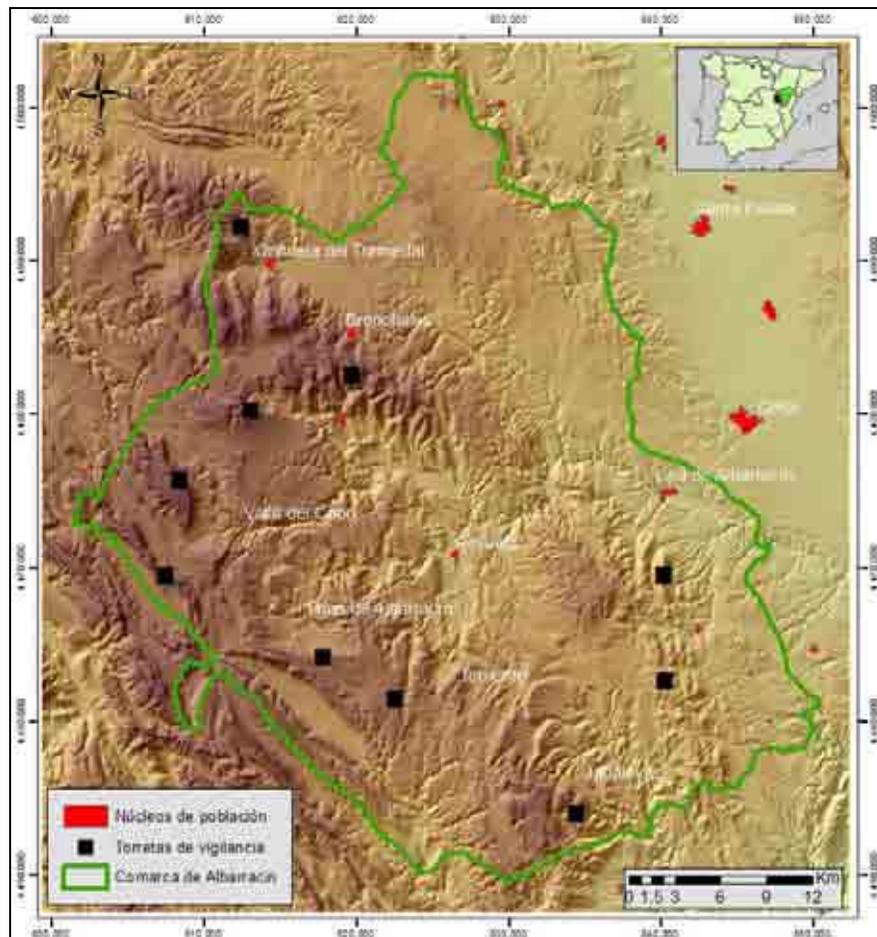


Figura 1: zona de estudio y localización de las torres de vigilancia existentes.

3. Antecedentes

Antes de que se empleasen programas informáticos para llevar a cabo procedimientos de análisis visual, la toma de decisiones en este tipo de problemas eran realizadas por aproximaciones subjetivas (Berry, 1993). El desarrollo tecnológico alcanzado en los últimos años ha puesto a nuestra disposición multitud de herramientas y datos que facilitan la realización de análisis de visibilidad; entre las primeras destacan aquellas incluidas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), y de los segundos merecen especial atención los modelos digitales de elevaciones, especialmente los obtenidos por medición (restitución analítica, estereocorrelación o LiDAR), debido a su alta precisión.

En relación con los métodos utilizados para el diseño de sistemas de detección de incendios mediante torres de vigilancia, considerando tanto un criterio estático (donde se conoce previamente el número de torres) como dinámico (basado en un análisis marginal, donde se va aumentando

gradualmente el número de torres hasta alcanzar lograr determinado porcentaje de visibilidad), la revisión bibliografía aporta diferentes alternativas que podrían resumirse en dos: (i) aquéllas que permiten obtener un buen resultado pero no óptimo y (ii) las que, con un mayor coste computacional, obtienen resultados óptimos.

Entre las primeras destaca, por su aplicabilidad, el método de Brown (1935). El procedimiento consiste en seleccionar el punto que posea la mayor visibilidad y, a continuación, ir seleccionando aquéllos que posean, sucesivamente, una mayor visibilidad complementaria. Se trata de un método de gran flexibilidad y con resultados muy aceptables, pero no permite alcanzar la combinación óptima de puntos de mayor visibilidad pues, excepto en el primer caso, la elección de los puntos mejor situados está condicionada por la elección de los anteriores; "*esto implica que al crecer el número de torres aumenta la probabilidad de alejarse de la máxima visibilidad*" (Pedrera *et al.*, 1995).

Tapia (1983) sugiere el "*Método de cobertura virtual efectiva*" que, basado en jerarquía de puntos, pondera la superficie forestal visible a partir de los factores de riesgo, peligro y daño potencial; el resultado es un método de localización de torres de vigilancia a través del análisis de la eficiencia de esos puntos.

Julio (1984) también propone una metodología basada en el análisis de la eficiencia de cada punto candidato: a cada celdilla de la zona de estudio se la asigna un valor en función de su visibilidad y prioridad de protección respectiva, y estos valores pasan a caracterizar a la torre que las divisa.

Las alternativas propuestas para obtener resultados que puedan considerarse óptimos han sido diversas. Weil (1979) aporta dos soluciones: (i) el "*Criterio de maximización pura*", que consiste en analizar la visibilidad de una serie de puntos de forma combinada, con el propósito de cubrir la máxima superficie visible; este método suele abordar un número de cálculos excesivo. Posteriormente el autor propone un segundo método (ii) denominado "*Selección iterativa de cumbres*", donde caracteriza cada punto candidato en función de su visibilidad, distancia y grado de exclusividad; ponderadas las diferentes clases de puntuación obtenidas mediante un conjunto de ecuaciones, son eliminadas las cuatro localizaciones con menor valor. El proceso se repite hasta alcanzar el número de puntos deseado.

Pedrera *et al.* (1995) resuelven la cuestión mediante programación lineal: denominado "*Problemas de cobertura*" (Prawda, 1993), el énfasis recae en el tratamiento del problema como una cuestión de localización óptima, donde una serie de puntos alternativos (oferta) debe satisfacer la demanda de una segunda serie de puntos, al menor coste posible; mediante la exploración heurística de todas las posibles combinaciones se llega a obtener la mejor solución.

Echeverría (1995) desarrolló un modelo combinatorio, basado en la exploración de todos los resultados posibles para un número de elementos determinado, con el objetivo de maximizar el área cubierta. El método permite restringir el número de puntos candidatos según su superficie mínima aceptable.

Tapia Koch (2008) plantea la utilización de puntos críticos del relieve (hitos) y, a partir de una modificación del modelo de Echeverría (1995), realiza el análisis a partir de las combinaciones llevadas a cabo con *software* libre; entre los resultados obtenidos comprueba que no existe un importante reemplazo de puntos a medida que aumenta el número de éstos en la combinación.

Por último, Reyes Schenke y Hernández Rodríguez (2009) realizan una novedosa aportación al emplear los modelos de localización y asignación (P-centros), aplicando la técnica heurística del algoritmo MonteCarlo.

4. Metodología

En este apartado se muestra la metodología seguida en este trabajo, mediante la cual es posible generar la red de intervisibilidad y, a partir de ella, aplicar algoritmos de localización y asignación óptima que permitan resolver los objetivos específicos anteriormente indicados.

En relación con el objetivo principal, la generación de la red de intervisibilidad, el proceso ha sido realizado en su totalidad con herramientas integradas en el programa *ArcGIS* 10 y consta de las siguientes fases: (i) elección de los puntos de alta visibilidad (aquí denominados PAV); (ii) elección y caracterización de los puntos a observar (PaO); (iii) generación de las líneas de intervisibilidad entre PAV y PaO, y (iv) generación de la red de intervisibilidad.

Para la resolución de los objetivos específicos se utilizará el módulo *Location-Allocation*, incorporado en la extensión *Network Analyst* de la versión 10 de *ArcGIS*. Este módulo posibilita la realización de análisis relacionados con una doble vertiente: la localización óptima de servicios y la asignación de los puntos de demanda a esos servicios. El proceso tiene dos fases: (i) la selección de los puntos mediante la aplicación de los métodos de localización óptima, y (ii) el cálculo de la cuenca visual de los puntos seleccionados.

4.1. Metodología para la generación de la red de intervisibilidad

4.1.1. Elección de los puntos de alta visibilidad

La elección de los puntos de mayor visibilidad sobre una zona no es una cuestión menor; si bien es cierto que el campo visual de un punto aumenta a medida que lo hace su altura, también lo es que la extensión de su cuenca visual depende de las características topográficas del entorno, que puede actuar a modo de barrera; en este sentido, Guerrero *et al.* (2012) afirman que "*los valores más altos de visibilidad se localizan en llanuras francas o cadenas montañosas cercanas a ellas, y no en cimas de montañas como se podría pensar a priori, en donde a pesar de la posición privilegiada, es mucha la superficie que queda escondida al observador*".

Desde la óptica de los modelos digitales de elevaciones raster, donde la información altimétrica ha sido reducida a la que portan puntos equidistantes cuya proximidad depende del

tamaño de celdilla, el método más preciso para conocer cuáles son las localizaciones de mayor visibilidad pasa por calcular las cuencas visuales de todos los puntos. De este modo es posible otorgar un valor de visibilidad a cada uno de ellos y, por tanto, conocer los que poseen un mayor valor. Este procedimiento, de alto coste en términos computacionales, no asegura sin embargo el conocimiento acerca de la mejor combinación de localizaciones de alta visibilidad para que, con el menor número, se obtenga la mayor cuenca visual, especialmente por el alto número de localizaciones a analizar.

Si se parte de la idea de que los puntos que poseen una mayor visibilidad poseen una serie de características que permiten que, de toda la población de localizaciones, sea extraída una muestra representativa, es posible reducir su número y, por tanto, realizar sobre ellos un análisis más detallado. En este sentido, podría considerarse que los puntos de mayor visibilidad son aquéllos que poseen la mayor altura en un radio determinado, a la vez que no están directamente rodeados por otros cuya altura los iguale.

El programa *ArcGIS* 10 provee de dos herramientas que permiten extraer sendos conjuntos con esas dos características: (i) la herramienta *Focal Statistics* permite, tras sencillas operaciones de álgebra de mapas, generar una capa de puntos que serían los de mayor elevación en un radio dado, y (ii) la función asociada al comando *VIP* es capaz de generar una segunda capa de puntos correspondientes a celdillas cuya altura es superior a las ocho que la rodean (cimas); si bien es cierto que no todas las cimas son los puntos más altos en un entorno dado, también lo es que no todas las localizaciones cuya altura es superior a las del entorno son consideradas cimas. Aquí se ha optado por generar una capa de puntos de alta visibilidad considerando que las localizaciones seleccionadas cumplan ambas características: ser las más altas en un radio determinado y ser, a la vez, cimas. Dado el tiempo que conlleva el procesamiento de la información en lo que a análisis de visibilidad respecta, se han elegido aquellos puntos de mayor altura en un radio de 40 m, y de ellos se han escogido tan solo los coincidentes con las cimas; el número definitivo de puntos de alta visibilidad es de 387 (véase figura 2).

4.1.2. Elección de los puntos a observar y su caracterización

Para la generación de una muestra representativa de los puntos a observar se ha optado por la creación de una capa de polígonos regulares que cubre la zona de estudio y en el interior de cada uno ha sido elegida al azar una localización; esto permite obtener una capa puntual que sigue las pautas del muestreo aleatorio estratificado. Los rectángulos tienen unas dimensiones de 100 x 100 metros; la capa definitiva de puntos a observar (PaO) consta de 3021 elementos (véase figura 3).

Márquez Pérez, J. (2013): "Localización óptima de los puntos de mayor visibilidad combinada" *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-1, p. 195-219. ISSN: 1578-5157

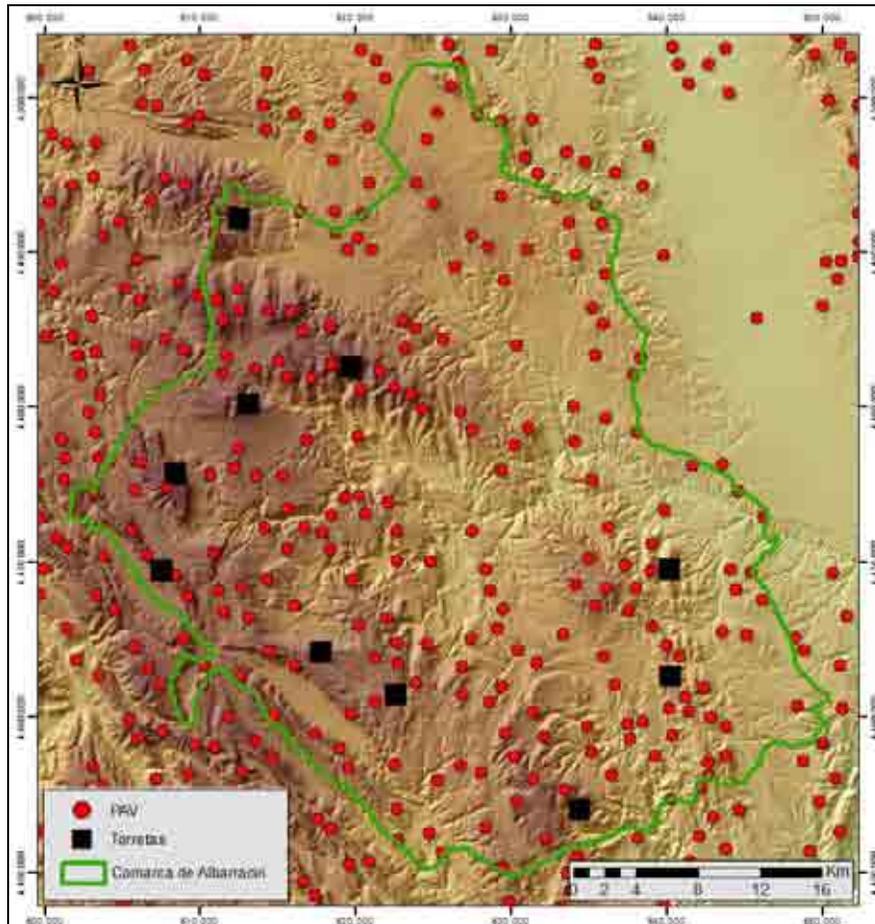


Figura 2: localización de los puntos de alta visibilidad (PAV).

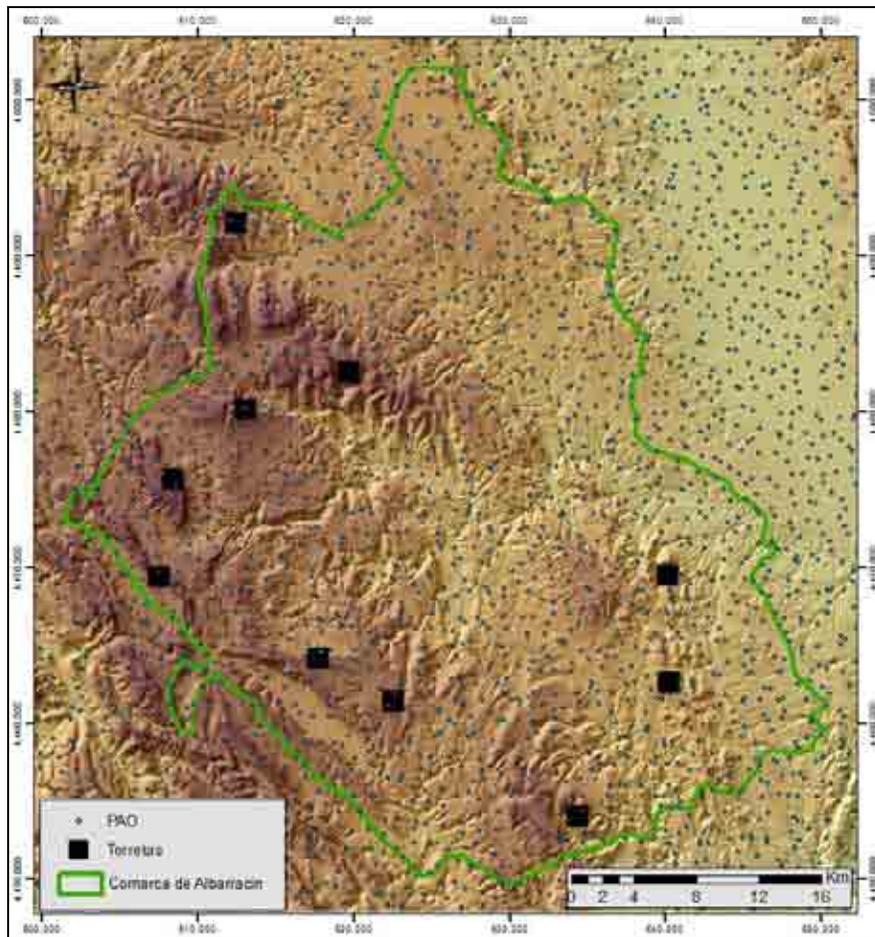


Figura 3: Localización de los puntos a observar (PaO).

Dado que el objetivo concreto consiste en conocer la mejor ubicación para una serie de torres de vigilancia visual sobre zonas de bosque, es fundamental la caracterización de los PaO mediante el tipo de cobertura vegetal existente en cada punto (véase figura 4). Para simplificar, se le ha asignado a cada punto un valor que permita distinguir los situados en zonas con vegetación (75%) de aquellos localizados en suelo desnudo (25%). Sin embargo, el método posibilita la consideración de una distinta ponderación de los puntos a observar, que vendría dada tanto por su mayor peligro de incendio como por las especiales características de su vegetación; la localización definitiva de las torres dependería de los valores asociados a cada uno de esos puntos.

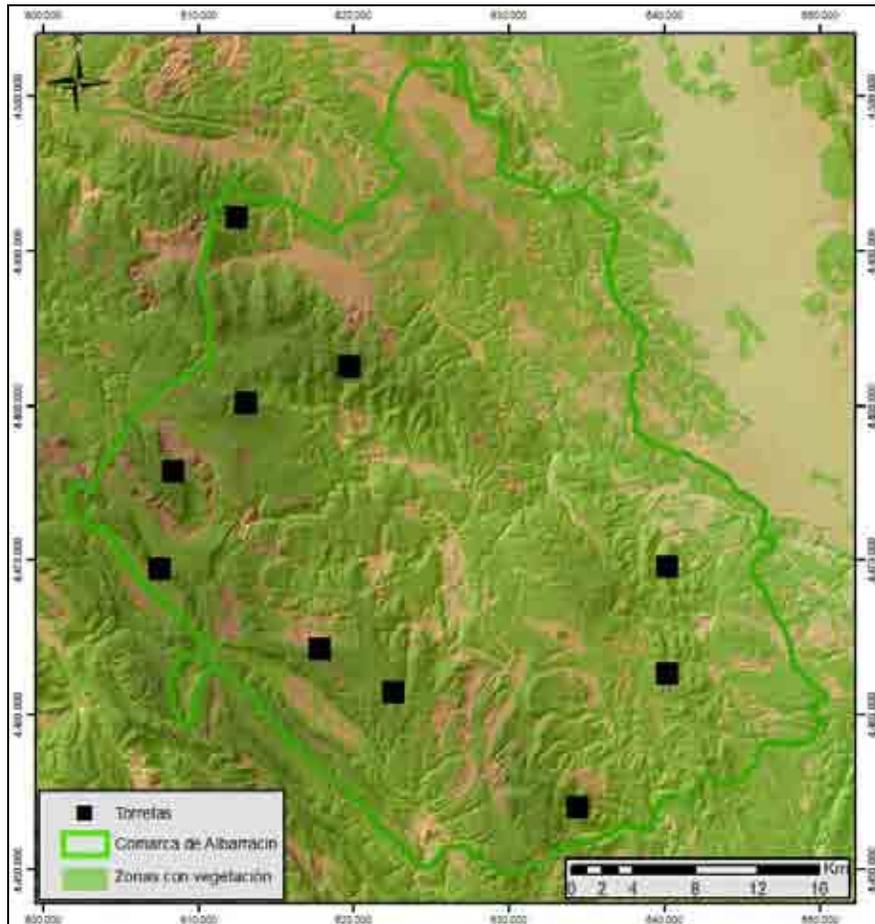


Figura 4: Cobertura vegetal en la zona de estudio

4.1.3. Generación de las líneas de intervisibilidad

El objetivo es generar una capa de líneas que enlace cada PAV con los PaO que visualice; se trata de una relación de M a N, pues del mismo modo que un PaO puede ser observado por varios PAV, un mismo PAV puede ser observado por varios PaO.

La realización de análisis de visibilidad e intervisibilidad en *ArcGIS* puede llevarse a cabo mediante dos conjuntos de herramientas: (i) *Viewshed* y *Observer Points* permiten caracterizar de forma cuantitativa y cualitativa, respectivamente, la visibilidad de las celdillas de un raster a partir de una serie de puntos (observadores); (ii) *Line of Sight*, que caracteriza la visibilidad de líneas usualmente generadas con *Construct Sight Lines*, dan lugar a una serie de arcos que unen a los PAV

con los PaO divisables desde ellos. Debido a sus específicas peculiaridades (herramientas 2D las primeras y 3D la segunda), los resultados obtenidos con ambas no son exactamente iguales, por lo que se ha optado por una combinación de estas herramientas (*Viewshed* y *Construct Sight Line*) para, en definitiva, obtener resultados propios del 2D.

La utilización de la herramienta *Viewshed* permite la elección de valores para una serie de parámetros: (i) en relación con la altura del observador, las torretas de vigilancia existentes en la zona se levantan entre 14 y 19 m (aquí se opta por otorgar un valor de 20 m) (Pedernera *et al.*, 1995); (ii) respecto a la distancia de visibilidad, este valor depende de una serie de factores, entre los que destaca la orientación, y puede alcanzar casi los 60 km para detecciones remotas (del Río *et al.*, 2007), pero en este trabajo es utilizado un radio de visibilidad máximo, si bien sería posible emplear una longitud distinta pues puede limitarse la visibilidad en el segundo paso, o bien calcularse la extensión de cada uno de los arcos de intervisibilidad, y eliminar aquéllos que superen un umbral determinado; y (iii) dado que la curvatura terrestre y la refracción de la luz, debido al tamaño de la zona, pueden afectar a los análisis de visibilidad, se aplicarán los valores de corrección que *ArcGIS* propone: radio de 12.740 km y refractividad de 0,13.

El procedimiento es el siguiente (véase figura 5):

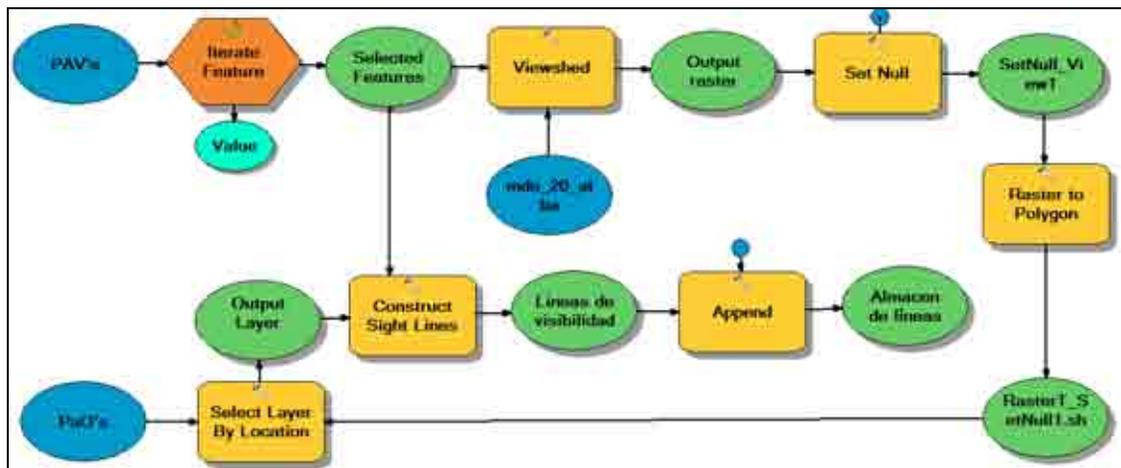


Figura 5: modelo para la generación de las líneas de intervisibilidad.

- 1- Seleccionar, del conjunto de los 387 PAV, el situado en primer lugar en la tabla de atributos.
- 2- Calcular la cuenca visual del punto, indicando unos valores determinados para los parámetros de visibilidad: la altura del observador (20 m), radio de visibilidad (máximo) y curvatura terrestre y refracción (valores por defecto).
- 3- Convertir la cuenca visual obtenida (raster) a vector (habiendo previamente eliminado las zonas no visibles desde el punto).
- 4- Seleccionar todos los PaO coincidentes con los polígonos de visibilidad generados.

- 5- Generar líneas que enlacen todos los PaO seleccionados y el PAV elegido en primer lugar; posteriormente podrán ser eliminadas todas aquellas que superen determinada longitud.
- 6- Almacenar las líneas obtenidas en el paso anterior en una capa almacén.
- 7- Iterar: este proceso permite la elección del PAV situado en segundo lugar en la tabla y, tras la realización de las operaciones anteriores, un nuevo conjunto de líneas de intervisibilidad es almacenado junto al primero.
- 8- Repetir el proceso hasta evaluar todos los PAV, de modo que las líneas de intervisibilidad correspondientes hayan sido almacenadas en la misma capa. Una muestra de los resultados puede ser observada en la figura 6.

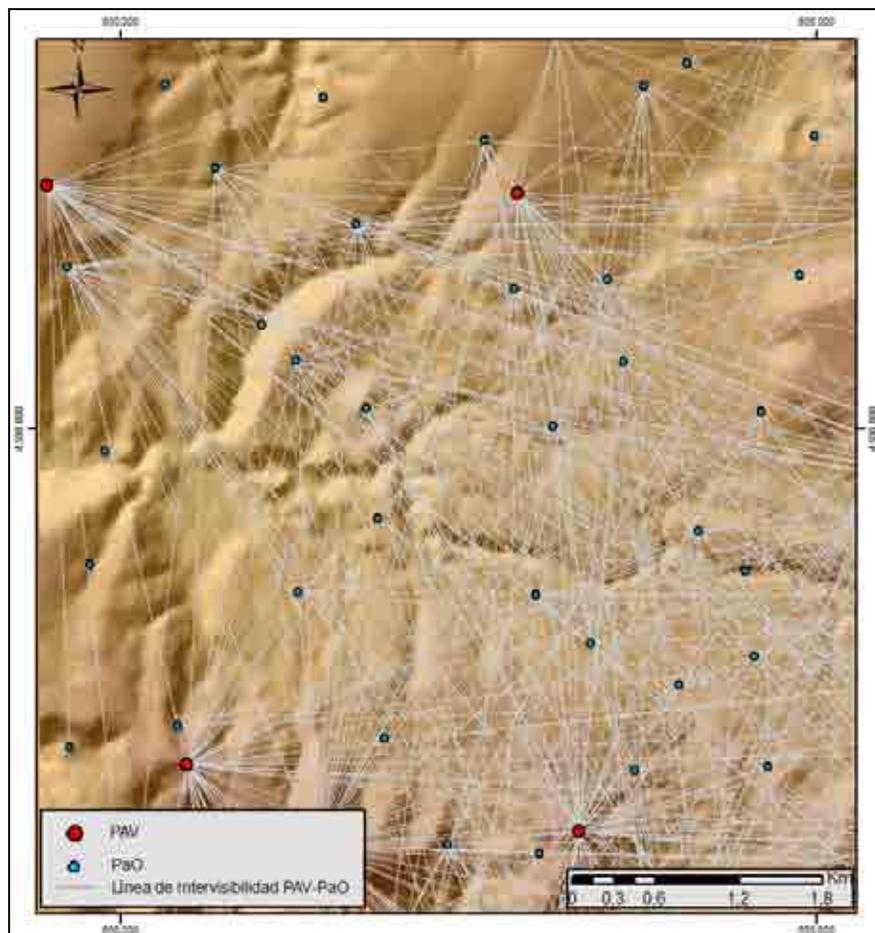


Figura 6: Líneas de intervisibilidad entre PAV y PaO (sector NO).

4.1.4. Generación de la red de intervisibilidad

La generación de una red de transporte en *ArcGIS* requiere el uso de la extensión *Network Analyst*. Si como dato de entrada es empleado la capa que contiene las líneas de intervisibilidad generada con anterioridad, el resultado es una red (*Network Dataset*) formada por líneas rectas que

unen los PAV a los PaO visibles desde ellos. Sin embargo, los algoritmos de la red están diseñados para minimizar la impedancia y, si se considera como atributo de coste la longitud, desde cualquier PAV puede alcanzarse cualquier PaO, obviando la relación de visibilidad recíproca existente. Para resolver esta cuestión es generada en la capa de arcos un nuevo campo que almacene el número de arcos de que consta cada registro (lógicamente, 1). La creación de un atributo de coste basado en el número de tramos consigue que, para minimizar ese coste, cada PaO sea enlazado con aquellos PAV de los que diste el menor número de tramos posible, es decir, cada PAV se conecta tan solo con los PaO que visualiza.

4.2. Metodología para la aplicación de los métodos de localización óptima al análisis de redes

4.2.1. Selección de los puntos mediante la aplicación de los métodos de localización óptima

Para la elección óptima de los puntos de mayor visibilidad en el área de estudios se han utilizado los algoritmos *Minimize Impedance* y *Maximizad Market Shared*. (i) *Minimize Impedance* selecciona un número previamente especificado de PAV, de modo que el número de PaO asociado sea el máximo; si la impedancia se basa en el número de tramos y el valor elegido es 1, al existir un solo tramo por cada línea de intervisibilidad se asegura que solo serán asociados a cada PAV aquellos PaO que visualiza; en el caso de que hubiese dos o más puntos de alta visibilidad que visualizasen el mismo punto, éste será asociado a tan solo uno de ellos, aquel cuyo tramo sea de menor longitud (el más cercano). (ii) *Maximizad Market Shared*, a diferencia del anterior, proporciona el número de PaO que en total visualiza cada PAV, y no solo el de aquéllos que se le asocian en exclusiva debido a su cercanía. En cualquier caso, los resultados obtenidos por ambos algoritmos, desde el punto de vista de la localización de los puntos, son exactamente iguales.

Conocida la localización de las 10 torretas situadas en el área de estudio, el objetivo es investigar si existen 10 localizaciones que obtengan una mayor cuenca visual en esa área, y para ello se generarán 10 nuevos PAV a partir de la red de intervisibilidad, empleando el algoritmo *Minimize Impedance*. Posteriormente, se compararán las cuencas visuales de los dos conjuntos de puntos, considerando tanto el número de PaO visibles como el de celdillas y, en cada caso, tanto la zona visible como la zona visible con vegetación.

La designación de 5 nuevas localizaciones de alta visibilidad sobre la vegetación, que complementen la visibilidad de las 10 torretas existentes, conlleva el empleo del algoritmo *Minimize Impedance*; en esta ocasión el método es ligeramente modificado para dar cabida a las localizaciones de las 10 torretas que, una vez incluidas en la red de intervisibilidad, serán consideradas como "requeridas" (mientras las restantes son consideradas "candidatas").

Conocer la ubicación del mínimo número de puntos de alta visibilidad necesario para visualizar la totalidad de las celdillas del MDE, en una zona de relieve montañoso de las características de la comarca de Albarracín, probablemente requeriría un número de PAV y PaO similar al número de celdillas. Dado que será utilizado el mismo conjunto de puntos de alta visibilidad y de puntos a observar empleado con anterioridad, el resultado no puede aspirar más que

a localizar el mínimo número de PAV que visualice el máximo número de PaO. El algoritmo *Minimize Facilities* permitirá conocer cuáles son esos puntos de alta visibilidad; posteriormente, es calculada la superficie visible desde ellos.

4.2.2. Cálculo de la cuenca visual de los puntos seleccionados

Los puntos observados son solo una muestra de toda la cuenca a visualizar, y de su número y distribución espacial, así como de las características topográficas de la superficie altimétrica, depende una mayor correlación positiva entre los PaO divisibles y la superficie realmente visible. Por esta razón, no basta con proporcionar los datos relativos a la visualización de la muestra de puntos a observar, y el resultado definitivo debe asociarse al número de celdillas visible, lo que implica el cálculo de la cuenca visual de los puntos de localización óptima.

Para la generación de las nuevas cuencas visuales son utilizados, lógicamente, los mismos valores en los parámetros de visibilidad que los anteriormente empleados en la generación de la red de intervisibilidad: altura del observador (20 m), radio de búsqueda (infinito) y corrección por curvatura terrestre y refracción (valores por defecto).

5. Resultados

5.1. Localización óptima de los puntos de visibilidad en el área de estudio

En la figura 7 se observa que el PAV con mayor visibilidad se sitúa en el extremo superior derecho de la zona de estudio; alcanza a visualizar el 21% de las celdillas del MDE y el 13,8% de la zona con vegetación. Analizada la visibilidad de cada una de las torres existentes, la que posee mayor valor no alcanza el 20% del total de la superficie, aunque sí llega a visualizar hasta el 15% de la zona boscosa. El hecho de que el PAV seleccionado divise un número de celdillas con vegetación algo inferior al de la torre de vigilancia mejor situada en este sentido se explica por la diferencia existente entre la población de celdillas y la muestra que en el método se emplea, pues, en realidad, la torreta divisa un número de PaO con vegetación inferior al que se visualiza desde el PAV (329 y 357 puntos, respectivamente).

Márquez Pérez, J. (2013): "Localización óptima de los puntos de mayor visibilidad combinada" *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-1, p. 195-219. ISSN: 1578-5157

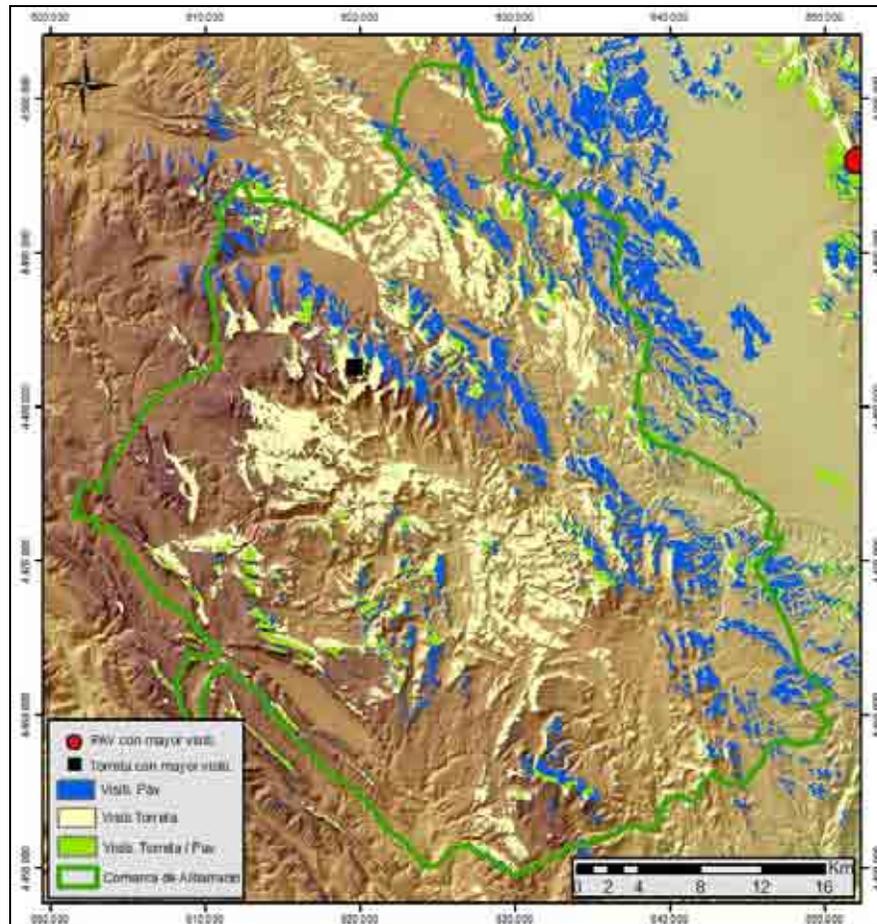


Figura 7: Cuencas visuales sobre áreas con vegetación, de la torre y el PAV mejor situados.

La figura 8 permite apreciar el número de PAV seleccionado cuando se desea encontrar los 1, 2 (...) 8 PAV que poseen mayor visibilidad conjunta. Dos hechos se ponen de relieve: (i) a medida que aumenta el número de puntos elegidos los anteriores no siempre se mantienen como puntos de mayor visibilidad (es el caso del PAV elegido en segundo lugar, pues no vuelve a aparecer en las selecciones posteriores), y (ii) si los valores asociados a cada punto indican el número de PaO que visualizan, puede comprobarse que algunos puntos seleccionados en fases posteriores poseen una mayor visibilidad que los previamente elegidos (la razón se debe a que lo que al algoritmo importa es el número de nuevos PaO que aporta al conjunto, y no los que por sí mismo divisa).

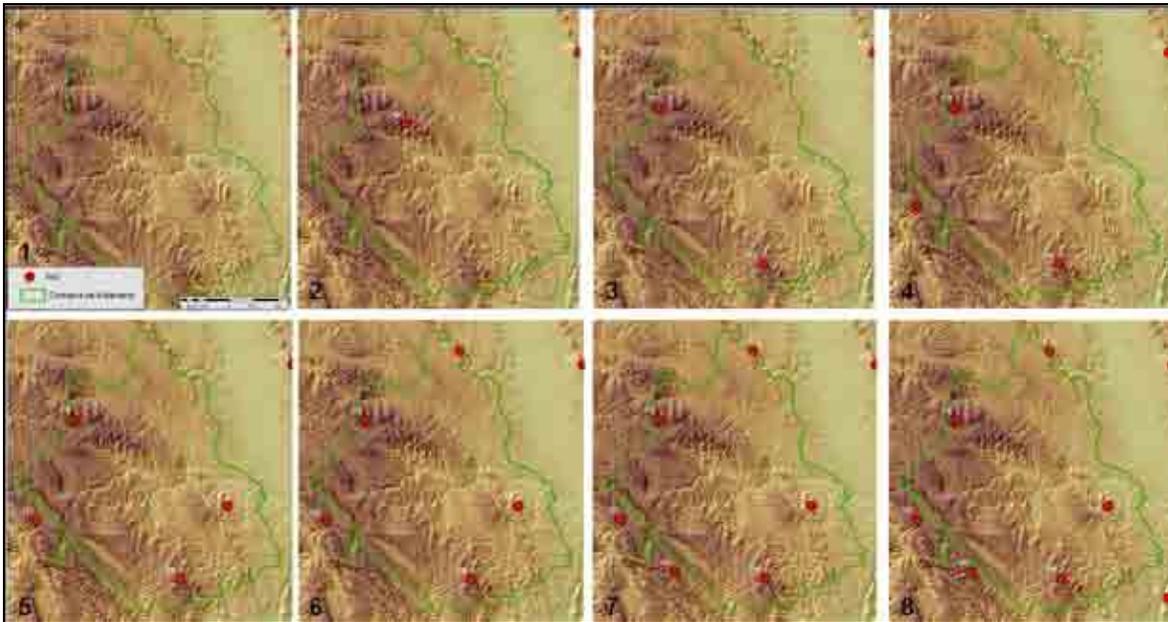


Figura 8: Fases del proceso de selección de los 8 PAV con mayor visibilidad combinada.

5.2. Localización óptima de 10 torres de vigilancia de incendios

En la figura 9 se muestran las áreas visibles desde las 10 torres de vigilancia y los 10 PAV mejor situados; la cuenca visual de las torretas contiene el 44,3% de las celdillas del MDE y alcanza a divisar el 40,8% de la zona con vegetación. La zona visible desde los PAV abarca el 58,3% de todas las celdillas y supone el 54,9% de las zonas con vegetación. Con estos datos es posible afirmar que, dadas unas condiciones de accesibilidad y visibilidad similares, el método propuesto permite la localización de unos emplazamientos que ampliarían notablemente la visibilidad de las torretas de vigilancia de incendios en la zona de estudio.

Márquez Pérez, J. (2013): "Localización óptima de los puntos de mayor visibilidad combinada" *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-1, p. 195-219. ISSN: 1578-5157

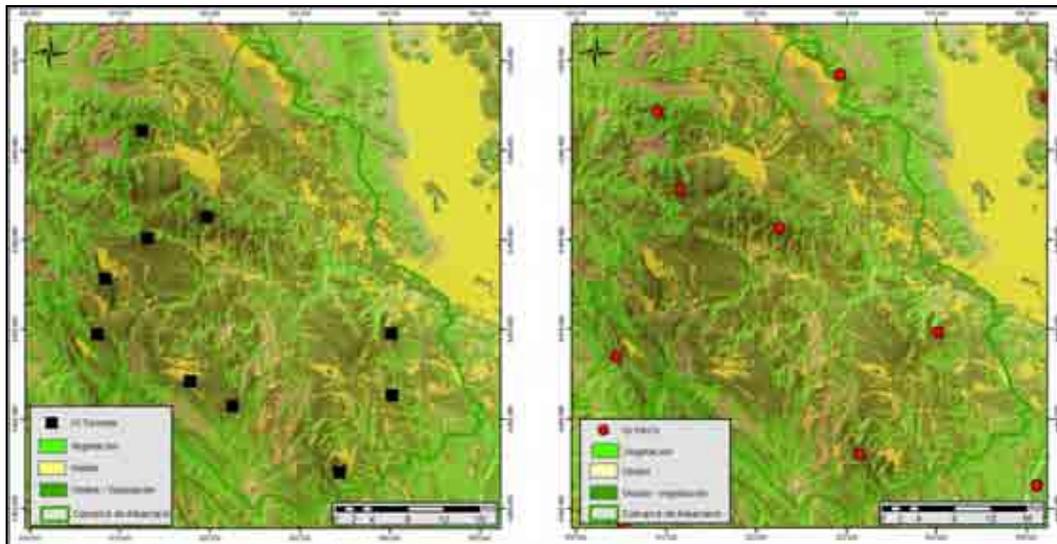


Figura 9: Localización y visibilidad de las 10 torres y los 10 PAV mejor situados.

5.3. Localización óptima de nuevas torres, considerando las ya existentes.

El resultado presentado en la figura 10, una vez calculadas las cuencas visuales de cada conjunto, indica que desde las 5 nuevas localizaciones se visualiza un 12,8% más del territorio que con las 10 torretas originales, y un 13,6% más de la vegetación existente. De este modo, la visibilidad total del conjunto de las 15 torres supondría un 56,2% del MDE y sería visualizado el 54,4% de toda la zona con vegetación.

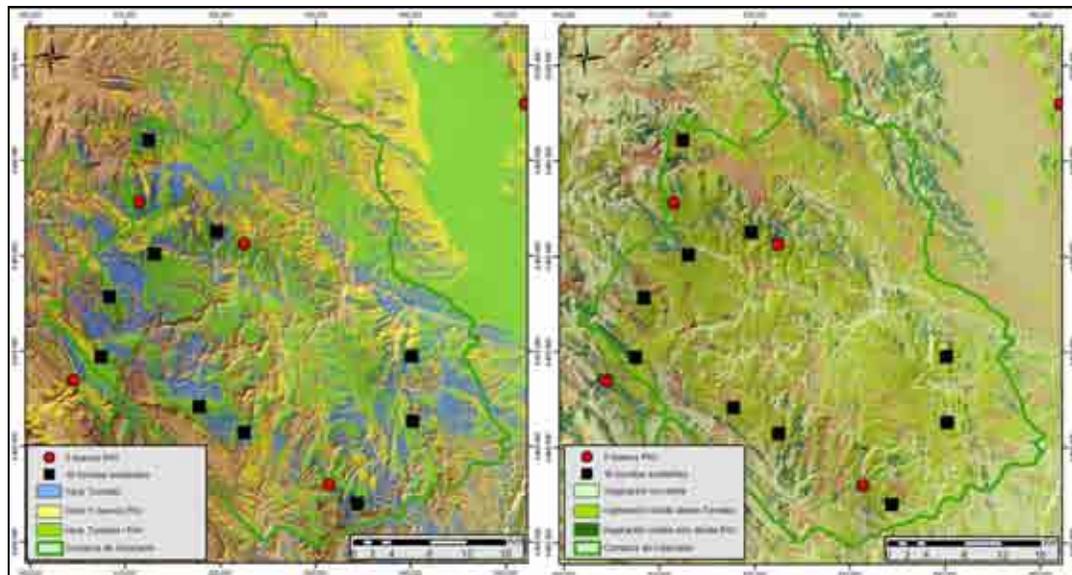


Figura 10: Cuencas visuales de las 10 Torres y los 5 nuevos PAV

5.4. Localización del mínimo número de torretas necesarias para visualizar la máxima extensión con vegetación.

El resultado obtenido (véase figura 11) indica que con 205 de 386 PAV es posible visualizar 2.261 de los 2.265 PaO con vegetación existentes, esto es, el 53,1% de los PAV permite visualizar el 99,8% de los PaO con vegetación, lo que supone una reducción considerable en el número de puntos de alta visibilidad necesarios para visualizar todos los PaO de la cuenca, si bien, al calcular la cuenca visual sobre las celdillas con vegetación, el porcentaje de celdillas visible es solo algo superior al 90%.

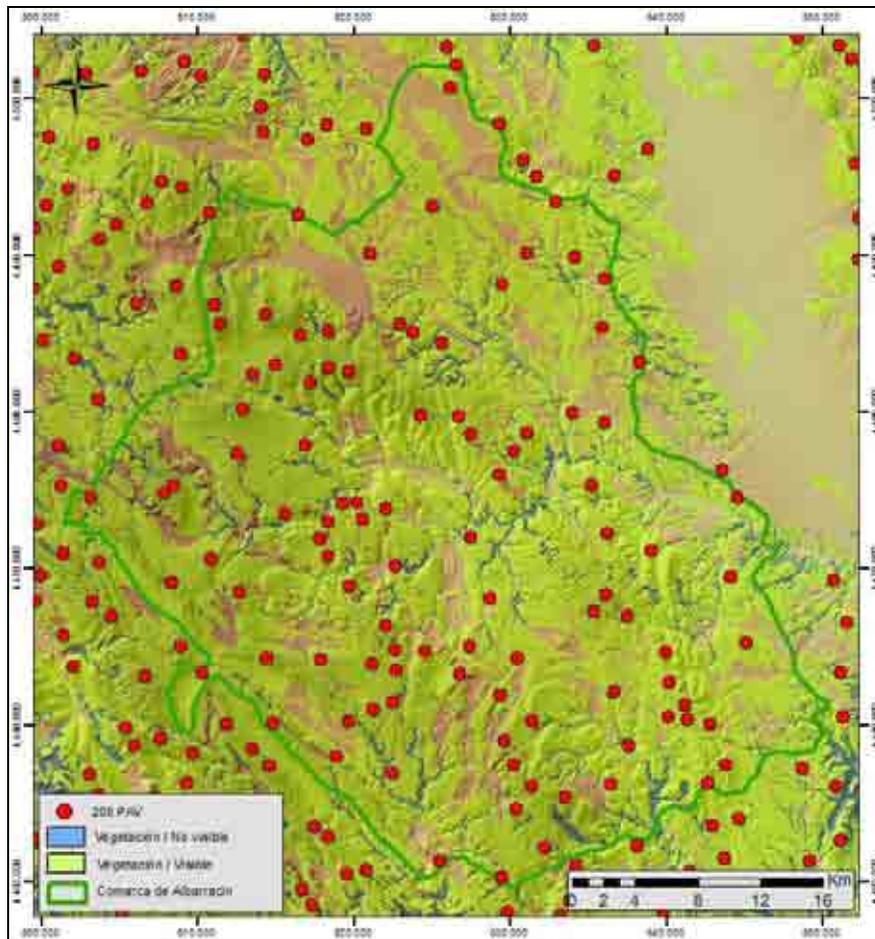


Figura 11: Máxima cuenca visual (con vegetación) obtenida con el mínimo número de PAV.

6. Comparación con otros métodos de optimización espacial del análisis de visibilidad

Es escasa la literatura que informe acerca de comparaciones entre técnicas de solución de problemas relacionados con la optimización espacial de análisis de visibilidad (Reyes y Hernández, 2009), y de ahí el interés en contrastar los resultados obtenidos por el método basado en la red de intervisibilidad.

De los métodos empleados para conocer la combinación de puntos que resulte en una mayor visibilidad, el método de Brown (1935) destaca por su sencillez y facilidad de aplicación. En este apartado serán cotejados los resultados obtenidos por este método con los logrados a partir de la red de intervisibilidad.

El método de Brown se basa en dividir la zona de estudio en cuadrantes, seleccionar dentro de cada uno el punto de mayor altura y, una vez calculadas sus cuencas visuales, seleccionar aquel punto que posee la mayor visibilidad (González, 2009). Subsiguientes análisis se realizan con el resto de los puntos, pero ya solo considerando la zona no visible desde la localización elegida en el proceso previo. Este proceder tiene una serie de inconvenientes: (i) basa la elección inicial de los puntos en la altimetría (cuando no siempre el punto más alto es el que posee mayor visibilidad); (ii) de todos los puntos existentes en cada cuadrante tan solo uno es seleccionado (cuando podrían coexistir varios con cuencas visuales nada coincidentes), y (iii) obliga a que los puntos elegidos en fases previas pasen a formar parte del conjunto definitivo de puntos seleccionados (cuando no es imprescindible que deban pertenecer necesariamente a la combinación más adecuada, como posteriormente se demostrará).

Para comparar la efectividad de ambos métodos serán realizados los distintos cálculos de visibilidad sobre toda la superficie del área de estudio (y no solo la que posee vegetación), y los resultados se asociarán tanto al número de PaO visibles como al número de celdillas. Dado que el método de Brown requiere la especificación previa del número de cuadrantes, éste será de 16, y los resultados se compararán en cada una de sus 16 fases.

En la figura 12 pueden revisarse los resultados obtenidos por cada método en cada fase de su aplicación, en función de la visualización de PaO y celdillas. Aun dando resultados bastante similares, se comprueba que el número de puntos a observar por el método de redes es siempre superior al visualizado por el método de los cuadrantes; al contabilizarse las celdillas, sin embargo, el método de redes solo se muestra ligeramente superior a partir de la fase n° 10. La razón de esta diferencia reside en la discretización de la superficie visible que supone la muestra formada por los PaO, pues el método de los cuadrantes se basa en el número de celdillas contenidos en la cuenca visual, mientras que el basado en el análisis de redes toma como referencia los puntos a observar, conjunto que se muestra más representativo a medida que aumenta el número de observadores.

Márquez Pérez, J. (2013): "Localización óptima de los puntos de mayor visibilidad combinada" *GeoFocus (Artículos)*, n° 13-1, p. 195-219. ISSN: 1578-5157

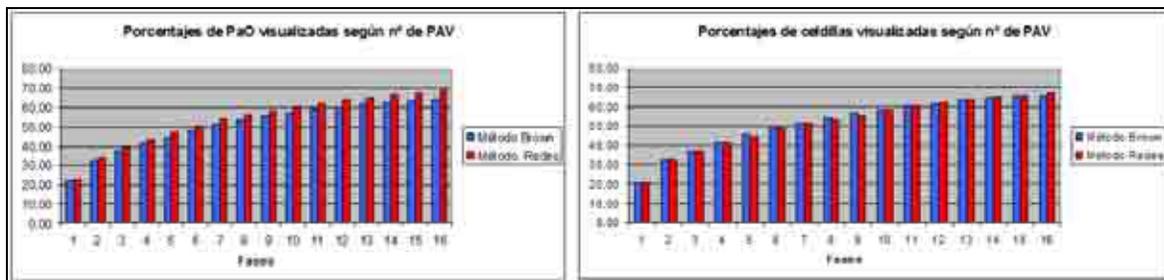


Figura 12: Porcentaje de PaO y celdillas visualizados en cada fase de aplicación de los dos métodos de localización óptima comparados.

Respecto a la ubicación de los 16 puntos de mayor visibilidad conjunta obtenidos por cada método, la figura 13 permite comprobar que no más de 10 de los 16 puntos elegidos por cada método se sitúan en localizaciones relativamente coincidentes. De ello se deduce que la localización de los mejores emplazamientos para obtener la mejor visibilidad combinada puede ser muy variada, y que con distintas combinaciones de puntos puede obtenerse una superficie visible bastante similar.

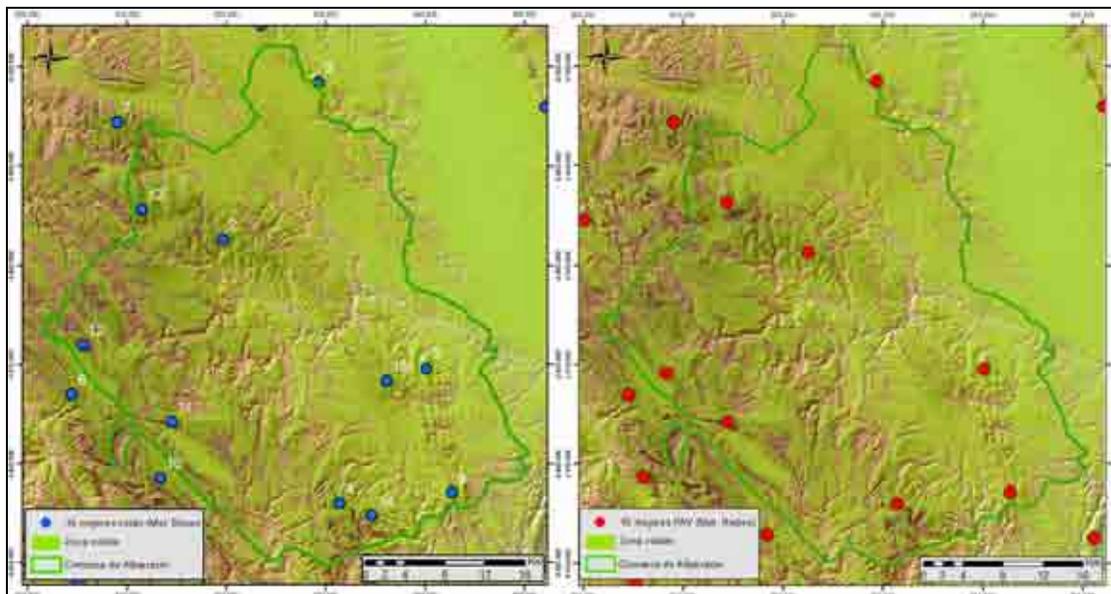


Figura 13: Localización y cuenca visual de los 16 puntos de visibilidad óptima obtenidos por los dos métodos de localización óptima comparados.

Por último, la jerarquía de los puntos escogidos según el método de Brown, dependiente de la fase de su elección e indicadora de su importancia, no puede ser aplicada al método propuesto pues los componentes de cada combinación anterior no siempre son seleccionados en una fase posterior, y de ahí que no sea posible asociarles un valor en esta jerarquía. El algoritmo de localización óptima trata cada conjunto de puntos seleccionados en cada fase como un grupo independiente de los restantes.

7. Discusión

En este trabajo el interés se ha centrado en la localización de puntos que posean la mayor visibilidad combinada, obviando algunos aspectos que, por su complejidad o especificidad, habría que tener en cuenta en futuros desarrollos.

Un preciso análisis de visibilidad podría considerar una doble delimitación de la zona de estudio, ya que si se desea que todos los puntos cuya visibilidad se quiere calcular puedan incluir su cuenca visual completamente en su interior, el área de estudio debería contener un subsector central del que extraer los citados puntos, siendo la distancia entre ambas zonas igual al radio de visibilidad (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1993). En este trabajo, sin embargo, se ha optado por la utilización de una sola zona debido al dilatado rango de visibilidad de este tipo de torres (entre 6,4 y 55,8 km., según del Río *et al.*, 2007), pues la ampliación de la zona de estudio llevaría a la inclusión de nuevas torres de vigilancia y, por tanto y como mínimo, a un nuevo aumento de su extensión, lo que dificultaría en exceso la aplicación metodológica.

El Modelo Digital de Elevaciones en formato raster es el más común, tanto por la forma usual de capturar datos altimétricos como por los resultados de los métodos de interpolación; habría que considerar, sin embargo, que el resultado de un análisis de visibilidad sobre celdillas es binario (vista/no vista). En este sentido, la utilización de la red de triángulos irregulares (TIN) para la representación de la altimetría no solo posee una serie de ventajas (Felicísimo Pérez, 1994; Florinsky, 1998), sino que posibilita que cada faceta triangular, al no ser constante su altura, pueda ser observada parcialmente, lo que aumentaría la precisión del cálculo visual.

La calidad del MDE es clave, ya que la altimetría es el dato geométrico más importante de los involucrados en los análisis de visibilidad. En este sentido, modelos digitales medidos poseen una incertidumbre mucho menor que MDE calculados (Ojeda *et al.*, 2006), pues a los errores propios de la medición de los datos originales hay que sumar los derivados de la interpolación espacial (Márquez, 2004). Por otra parte, en el caso de los modelos raster, el tamaño de celdilla es igualmente importante y debe relacionarse con el tipo de terreno a representar, ya que el nivel de detalle depende tanto de su resolución espacial como de la variabilidad altimétrica de la superficie (Wood, 1996).

La elección de la muestra de los puntos de alta visibilidad se ha basado en sus características topográficas absolutas (el más alto en 40 m de radio), y relativas (más alto que sus 8 vecinos). Ciertamente, para el caso concreto de la ubicación de torres de vigilancia habría que tener en cuenta otros aspectos de índole práctica, como son la accesibilidad a la localización, o su misma topografía.

El número de puntos a observar empleado en el análisis de intervisibilidad tiene una relación inversa con el tamaño de celdilla, pues a medida que aumenta la resolución espacial del modelo lo hace la población de la que extraer la muestra puntual. De los diferentes tipos de muestreo espacial, el aleatorio estratificado evita los problemas asociados a una distribución poco uniforme de los puntos, así como una coincidencia con un patrón regular del terreno. Sin embargo, el número de

elementos que componga la muestra está condicionado por la aplicabilidad de la metodología, pues una cantidad excesiva supondría, en el mejor de los casos, un costo en tiempo difícilmente asumible.

El método empleado por la gran mayoría de los SIG para el cálculo de la visibilidad no permite la adecuada superación de una serie de inconvenientes, entre los que están las barreras a la visibilidad; tanto la vegetación como artefactos humanos pueden interponerse entre el observador y lo observado, obstaculizando o impidiendo su visualización. Si bien es cierto que la cuestión puede inicialmente resolverse empleando un modelo digital de superficies (MDS) que incluya la altura de vegetación y edificios, autores como Fan *et al.* (2010) y Domingo Santos *et al.* (2011) proponen el empleo de herramientas 3D, y estos últimos demuestran la eficacia del empleo del ángulo sólido (superficie cubierta por un objeto dado en la retina del observador).

La consideración de la altura de lo observado no es un problema menor y, en este sentido, habría que ponderar dos cuestiones: la altura de la vegetación y la altura de la columna de humo. La altura de la vegetación podría incorporarse como *offset*, lo que posibilitaría una mayor cuenca visual, pero es complejo realizarlo sin modificar completamente el MDE, pues suele tratarse de un solo valor para todo lo observado. Por otra parte, la visualización de la columna de humo es el objetivo, más que la vegetación en sí; por esta razón debería cuantificarse la distancia altimétrica por la que deja de visualizarse una celdilla, pues si ese valor es equiparable al de la columna de humo antes del desplazamiento debido al viento, la celdilla no es vista, pero sí las consecuencias de su combustión. Este problema es resuelto por Guerrero *et al.* (2010), y en la versión de *ArcGIS* 10.1 aparece una herramienta con este fin.

En la bibliografía puede encontrarse una gran variedad de distancias de visibilidad para la detección de humos, y esto es debido a la dificultad para concretar la importancia de factores como las condiciones atmosféricas (orientación, franja horaria), meteorología (calima, niebla), características topográficas (variabilidad altimétrica, distancia al mar), contaminación atmosférica y visual (luminosidad, movimientos de vehículos, iluminación artificial) entre otras causas (Rego *et al.*, 2004). Sin embargo, también hay que considerar otros aspectos relacionados con la distancia. Del Río *et al.* (2007) analizan las torres de vigilancia de incendio en Valladolid y entre sus conclusiones se encuentra la importancia de la dirección de la detección y la posición fisiográfica; por esta razón concluyen afirmando que "no puede emplearse una distancia de detección constante e igual para todas las torres".

Por último, la caracterización de los puntos a observar: en este trabajo tan solo se ha distinguido entre aquellas celdillas (y puntos) coincidentes con vegetación, pero existe una gran cantidad de indicadores aportados por la bibliografía (Pedernera *et al.*, 1995; Tapia Koch, 2008; Francos Araque, 2008) que podrían sintetizarse en los relacionados con la vulnerabilidad de la vegetación, el peligro de incendio, y la accesibilidad de la zona para las labores de extinción, etc. Por esta razón habría que priorizar la protección de ciertas áreas, aumentando al menos el número de torres que la visualizan, lo que llevaría a un análisis combinatorio más complejo pero factible.

8. Conclusiones

La aplicación del método propuesto es relativamente rápida debido a la utilización de un modelo de datos que, en principio, parecía destinado a otros fines, la red. Una vez generada la red de intervisibilidad, que conecta mediante líneas rectas (líneas de intervisibilidad positiva) la muestra de los puntos observables con la muestra reservada para los puntos de mayor visibilidad, pueden obtenerse resultados inmediatos acerca de la elección del número y localización de torres de vigilancia que cumpla determinados criterios: número específico de puntos que abarque una mayor visibilidad combinada, número de puntos que (asociados a los ya existentes) genere la mayor cuenca visual, o mínimo número de puntos necesario para visualizar la mayor extensión.

El método propuesto tiene en cuenta, además, la posibilidad de que los puntos a observar tengan distinto valor, y genera distintos resultados en función de estas ponderaciones; si se considera que existen áreas que poseen un mayor riesgo de incendio, o zonas cuya vegetación debería tener una especial protección por su naturalidad, variedad o singularidad, la localización final de las torres de vigilancia priorizaría la visualización de tales áreas.

La modelización permite, por otra parte, profundizar en las características de la intervisibilidad de una zona, desde la óptica de determinar un número específico de mejores emplazamientos; aquellos que serían elegidos en caso de conocer previamente el número de localizaciones pudieran no ser los mismos cuando este número aumenta o disminuye, con las consecuencias que ello conllevaría.

La calidad de los resultados obtenidos depende de distintos factores: en los puntos de alta visibilidad analizados influye la precisión del modelo digital del terreno, así como el método empleado para generar los PAV y su número; junto a lo anterior, el número y localización de los PaO determinan la bondad del análisis de intervisibilidad. En cualquier caso, se trata de un modelo de análisis a partir de datos muestreados, pues una superficie continua (la altimétrica) es representada a partir de dos conjuntos de puntos (PAV y PaO), característica imprescindible para la aplicación de la metodología.

En este artículo el énfasis se ha puesto en la elección de la ubicación óptima de torretas de vigilancia de incendio, pero su aplicabilidad podría ir más allá incluso de aquellos puntos que por su visibilidad pueden ser de interés (miradores, por ejemplo), pues puede abarcar aquellas localizaciones de interés para la implantación de elementos relacionados con la telecomunicaciones (antenas o repetidores), si bien aquí habría que considerar una serie de parámetros adicionales (longitud de onda, reflexión o refracción), por lo que los resultados obtenidos más bien serían propios del proceso de investigación preliminar.

Por último, es de agradecer la colaboración en este trabajo del alumno de doctorado Germán Ramos Sancho y la labor de revisión desarrollada por los doctores Ismael Vallejo Villalta y Noela Sánchez Carnero.

9. Bibliografía

Brown, A. (1935): "Improving forest fire detection in California", *Journal of Forestry*, 33, 11, pp. 923-931.

Berry, J. K. (1993): *Beyond Mapping: Concepts, Algorithms and Issues in GIS*, Wiley and Sons Publishers.

Del Río, J.; Mompín, M. T. y García, J. A. (2007): "Aportaciones al cálculo de la distancia de detección de humos de las torres de vigilancia de incendios forestales", *GeoFocus*, 7, pp. 235-255.

Domingo Santos, J.; Fernández de Villarán, R.; Rapp Arrarás, I. y Corral Pazos de Provencs, E. (2011): "The visual exposure in forest and rural landscapes: An algorithm and a GIS tool", *Landscape and Urban Planning* 101, pp. 52-58.

Echeverría, J. (1995): *Modelo de localización de brigadas de combate de incendios forestales mediante patrullaje terrestre*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 110 págs.

Evans, I. S. (1972): "General morphometry, derivatives of altitude, and descriptive analysis", *Spatial analysis in geomorphology*. Chorley, R.J. New York, Harper and Row, pp. 17-90.

Fan, W.; Meng, X.; Liu, X. y Hu, N. (2010): "The design and realization on effectively fire tower planning based on MapGIS-TDE", *Journal of Geographic Information System*, 2, pp. 49-53.

Felicísimo Pérez, A. (1994): *Modelos digitales del terreno*. Oviedo, Pentalfa Ediciones. 220 p.

Florinsky, I. V. (1998). "Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations", *Progress in Physical Geography*, 22, pp. 33-60.

Francos Araque, A. (2008): "Algunas técnicas para el análisis y la prevención ante riesgos naturales de incendios, deslizamientos e inundaciones", *Actas del IX Congreso Nacional del Medio Ambiente, CONAMA*. Cumbre del Desarrollo Sostenible. Comunicación técnica. Disponible en www.conama9.org/conama9/download/files/.../2561_AFrancos.pdf.

Gao, J. (1997). "Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a microscale", *Int. J. Geographical Information Science*, 11, pp. 199-212.

González González, J.C. (2009): *Análisis de la localización óptima de torres de observación*. Disponible en <http://analisisterritoriales.blogspot.com.es/2009/11/analisis-de-la-localizacion-optima-de.html>

Guerrero, J.; Ghislanzoni, M.; Romero, D.; Cáceres, F.; Giménez de Azcarate, F. y Moreira, J.M. (2010): "Identificación y caracterización del paisaje mediante parámetros visuales del relieve. REDIAM", en: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la información geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp. 841-860

Julio, G. (1994): *Fundamentos del manejo del fuego*. Apuntes del curso de Control de Incendios Forestales. Escuela de ciencias forestales. Universidad de Chile. Santiago. 329 págs.

Márquez Pérez, J. (2004): *Modelos digitales de elevaciones, Métodos de interpolación, y parámetros morfométricos del relieve*. 2 vol. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. Disponible en

<http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/350/modelos-digitales-de-elevaciones-metodos-de-interpolacion-y-parametros-morfometricos-del-relieve/>

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (1993): *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Serie Monografías del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid. pp. 493-506.

Ojeda Zújar, J.; Márquez Pérez, J. y Gómez Molina, A. (2006): "Restitución analítica, Estereocorrelación y Lidar para la generación de modelos digitales del terreno en marismas mareales", *Actas del XII Congreso nacional de tecnologías de la información geográfica*. Granada. Septiembre de 2006. pp. 1121-1134.

Pedernera, P.; Julio, G. y Castillo, E. (1995): *Modelo de optimización para el diseño de sistemas de torres de detección de incendios forestales*. Laboratorio de Incendios forestales. Universidad de Chile. Disponible en <ftp.forestaluchile.cl/LINFOR/articulos/Diseño de un Sistema de Torres de Detección.pdf>

Prawda, J. (1993): *Métodos y modelos de investigaciones de operaciones. Vol. I y II. Modelos determinísticos*. Limusa Editores. México.

Rego, F.C.; Catry, F.X.; Maia, M.J.; Santos, T.A.; Gravato, A.; Castro, I.C.; Moreira, F.O.; Pinto, P.R. y Almeida, J. (2004): "Analysis of the National Lookout Towers Network", *Project Final Report*. Portugal, CEABN/ADISA – INESC/INOVAÇÃO. COTEC. pp. 13-20, 37-42, 49-51.

Reyes Schenke, M. y Hernández Rodríguez, F. (2009): "Optimización espacial de torres de detección de incendios forestales en la IX región de la Araucaria. Chile", en Mora Aliseda, J.; Condeso, F. y Castro Serrano, J. (coord.): *Nuevas tendencias en la ordenación del territorio*, Ed, Fundicotex. Caceres, pp. 335-349.

Tapia Koch, G.E. (2008): *Diseño de un sistema de torres de detección de incendios forestales para la región metropolitana*. Tesis doctoral. Universidad de Chile. Disponible en www.tesis.uchile.cl/handle/2250/105137

Tapia, R. (1983): *Proposición de un sistema de detección de incendios forestales para la costa de la VII región*. Tesis de Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Santiago. 146 págs.

Weil, E. (1979): *Detección de incendios forestales mediante torres de observación en la costa valdiviana*. Tesis de Ingeniería Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 71 págs.

Wood, J. (1996): *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. Tesis Doctoral. Department of Geography. Leicester (UK), University of Leicester: 109 págs.