

## Artigo

Alberto Santillán-Fernández · Eduardo Corbelle-Rico · Beatriz Omil · A. Fernández  
· F. Basurto · Horacio Santoyo-Cortés · Agustín Merino

## Análisis de factibilidad y viabilidad económica en la toma de decisiones para la aplicación de cenizas en áreas forestales

Recibido: 7 outubro 2015 / Aceptado: 19 outubro 2016  
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2016

**Resumen** La determinación de factibilidad, accesibilidad y logística para la aplicación de cenizas a áreas forestales, es una tarea compleja que agrupa varios objetivos. Este trabajo se centra en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la toma de decisiones para la optimización de la aplicación de cenizas. El estudio se realizó en dos etapas. La primera consideró aspectos ambientales, sociales, culturales y económicos enmarcados en el artículo 12 del decreto 125/2012 de la *Xunta de Galicia* para determinar la factibilidad de aplicación de cenizas a áreas forestales. En la segunda se determinó la accesibilidad y logística de aplicación a montes forestales de la provincia de Lugo. Para ello se construyó un modelo

heurístico e índice de rentabilidad económica por hectárea con ayuda de la herramienta *network analyst* de *ArcGIS*. Los resultados muestran que las herramientas de SIG, complementadas con trabajo en campo, facilitan la toma de decisiones y ayudan a redirigir la atención y recursos hacia aquellas superficies con un mayor potencial de aplicación de cenizas.

**Palabras Clave** Galicia, ceniza forestal, área forestal, accesibilidad, transporte, factibilidad, SIG.

**Feasibility and economic viability for decision making in the application of ashes in forest areas.**

**Abstract** The feasibility, accessibility and logistic determination for the ash application to forest areas, is a complex task the merge some objectives. This paper focus in the use of Geographic Information System (GIS) as a helper for decision-making of ash optimization application. The study was performed in two sections. The first section include environmental, social, cultural and economic aspects related to the article 12 of decree 125/2012 from the *Xunta de Galicia* for the feasibility determination of the ash application. The second one determinate the accessibility and logistic application to forestall places in Lugo province, so it was necessary to build a heuristic model and an economic rent index per hectare using the Network Analyst *ArcGIS* tool. The results shows that the GIS, complement it with fieldwork, tools helps the decision-making and to redirect the resources attention to those areas with better potential of ash application.

**Key words** Galician, wood ash, forestry area, accessibility, transport, factibility, GIS.

---

Alberto Santillán-Fernández  
División de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. Venustiano Carranza, 73049-Puebla (México).

Eduardo Corbelle-Rico  
Laboratorio del territorio. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior-USC. Campus Universitario s/n, 27002-Lugo (España).  
E-mail: eduardo.corbelle@usc.es

Beatriz Omil · A. Fernández · Agustín Merino  
Departamento de Edafología y Química Agrícola. Escuela Politécnica Superior-USC. Campus Universitario s/n, 27002-Lugo (España).

F. Basurto  
Grupo Empresarial Ence. Marisma de Lourizán s/n, 36153-Pontevedra (España).

Horacio Santoyo-Cortés  
Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, 56230-Estado de México (México).

---

### Introducción

En Galicia al norte de España, la biomasa forestal que llega a las industrias de transformación de madera (aserraderos, industrias de pasta de papel, industria de tablero, etc.), como la corteza, restos de corta, serrines, costeros y otros restos de madera (940.000 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>), se combustiona para

generar energía calorífica y secundariamente electricidad; esta actividad produce una gran cantidad de cenizas (entre 3 y 20 t diarios, según la factoría) las cuales no se reutilizan y son almacenadas en vertederos autorizados, por considerarse como un residuo no peligroso (Solla-Gullón *et al.* 2004a; Omil 2007). Estos residuos presentan elevados contenidos de nutrientes (Solla-Gullón *et al.* 2004b, Santalla *et al.* 2011, Omil *et al.* 2013), y su aplicación a los sistemas forestales intensivos que en la región mayormente son de *Pinus radiata*, *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus* mejora el estado nutricional de estos y repercute positivamente en la producción arbórea y reestructuración de suelos (Zas *et al.* 2003, Merino *et al.* 2003, Solla-Gullón 2004c).

Como alternativa a su transporte a vertederos, la utilización de cenizas de biomasa a manera de fertilizante en suelos ácidos, revaloriza este residuo y resuelve en parte un doble problema: los inconvenientes en la gestión medioambiental que sufren en la actualidad muchas industrias madereras y, la restitución de nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal (Solla-Gullón *et al.* 2004a, Solla-Gullón *et al.* 2004b).

Dada la importancia de las cenizas como fertilizante en los suelos forestales de Galicia, el siguiente eslabón es determinar la viabilidad y accesibilidad de los montes forestales para su aplicación. No todas las áreas son idóneas, por cuestiones principalmente de pendiente, usos de suelo, cercanía a cuerpos de agua, espacios naturales protegidos y áreas urbanas (DOG 2012), tamaño, acceso y costes.

Para resolver el problema de factibilidad, accesibilidad y logística en la aplicación de cenizas a áreas forestales, los Sistemas de Información Geográfica pueden ser una buena herramienta. Al respecto Fisher (2003) y Xie (2009) concluyen que el análisis de red de transporte en los SIG, simplifican la viabilidad, accesibilidad y logística de distribución de productos y servicios; al tener la capacidad de medir distancias, tiempos, costes y vincular diferentes tipos de información de carácter espacial y temporal.

Diferentes estudios como Gómez *et al.* (2001), Chias *et al.* (2001), Bosque *et al.* (2006), López *et al.* (2008) y Buzai *et al.* (2008) describen la bondad de emplear los SIG en la delimitación de viabilidad y accesibilidad para la distribución de productos industriales, residuos urbanos y diferentes servicios donde se requiere de transporte, bajo ciertas restricciones. Sin embargo hasta la fecha no existe ningún trabajo que use las herramientas de los SIG para determinar la factibilidad, accesibilidad y logística en la aplicación de cenizas a áreas forestales de Galicia.

Bajo este contexto el presente estudio emplea herramientas de Sistemas de Información Geográfica en la toma de decisiones para la optimización de la aplicación de cenizas a áreas forestales, el objetivo es jerarquizar las áreas forestales mediante una serie de restricciones para determinar cuáles deben atenderse en primer lugar y cuales quedarán sin tratar. Para ello se plantean dos fases, en la primera se evalúa la factibilidad de las áreas forestales en Galicia mediante criterios ambientales, sociales, culturales y

económicos; y en la segunda se determina la accesibilidad y logística de aplicación a áreas forestales de la provincia de Lugo.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

Se consideraron 10.040 ha forestales, distribuidas en la Comunidad Autónoma Galicia. De estas áreas se cuenta con un identificador de rodal, que las agrupa en 1.591 polígonos georeferenciados. De cada rodal (polígono) se dispone del nombre del monte donde se localiza (318 montes), año de plantación (desde 1970 a 2013), superficie (ha) y especie de plantación (*Eucalyptus spp.*, *Pinus spp.*, *Populus spp.* y *Pseudotsuga spp.*).

El estudio se efectuó en dos etapas, la primera contempló la factibilidad de aplicar cenizas a las áreas forestales (rodales) ubicadas en la comunidad autónoma Galicia, conforme las limitaciones del artículo 12 del decreto 125/2012 de la Xunta de Galicia (DOG 2012). En la segunda se determinó la accesibilidad y logística de aplicación de cenizas a los montes de la provincia de Lugo, en función de la disponibilidad para hacer las verificaciones en campo. Se consideró *rodal* a las áreas homogéneas en términos de condición de especies y edad, al conjunto de rodales se le denominó *montes*.

### Factibilidad para la aplicación de cenizas en las áreas forestales de Galicia

Los rodales anteriores se localizan en regiones con diferencias fisiográficas, económicas, culturales y sociales, lo que condiciona aspectos como la especie plantada, forma, tamaño y tenencia de la tierra. Se tuvieron en cuenta las áreas únicamente con plantaciones de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*.

A falta de una legislación que recoja las restricciones y metodología a seguir para incorporar las cenizas como fertilizantes. Se consideró la normativa del artículo 12 del decreto 125/2012 de la Xunta de Galicia por el que se legisla la aplicación de lodos como fertilizante (DOG 2012). Tomando en consideración los siguientes criterios: no serán elegibles aquellas áreas con pendientes iguales o mayores al 25%, que estén en alguno de sus puntos a menos de 50 metros de cursos de agua (ríos, lagos y humedales), que se encuentren dentro del ámbito territorial de un espacio natural protegido, a menos de 30 m del camino de Santiago en sus distintas variantes que pasan por Galicia; y a menos de 250 m de núcleos urbanos (residencias, hostelerías, comercios, industrias, áreas deportivas o recreativas) o algún bien inmueble catalogado como de interés cultural.

Mediante una selección por localización se extrajeron los rodales ubicados espacialmente en la comunidad autónoma Galicia. Su factibilidad se determinó con las herramientas *buffer*, *intersect* y *clip*, superposición de capas y

aplicaciones WMS de los sistemas de información geográfica, con los recortes necesarios.

La información georeferenciada que se combinó con la capa geográfica de los rodales, se extrajo del Centro Nacional de Información Geográfica (IGN 2014) y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA 2014), y fue: modelo digital del terreno (MDT25), hidrología (ríos, lagos y humedales), ortofotos PNOA máxima actualidad (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) y servicios WMS (*Web Map Service*) para visualizar los datos del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), espacios protegidos (áreas marinas, espacios naturales y red natura 2000), camino de Santiago, cartografía catastral y uso del suelo.

Finalmente una vez delimitada la factibilidad por los criterios anteriores, se seleccionaron caso por caso aquellos montes forestales cuya agrupación fuese igual o mayor a 10 ha, en virtud de los costos de aplicación de ceniza.

### Accesibilidad y logística de aplicación de cenizas a montes forestales de Lugo

Para determinar la accesibilidad y logística de aplicación de cenizas por monte, se construyó (a partir de opiniones con expertos de la Universidad de Santiago de Compostela y Grupo Empresarial ENCE) un modelo heurístico manera de buscar la solución a un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.) que optimiza los costes de operación, distancias y tiempos de traslado del centro de acopio de cenizas a las áreas de aplicación. En esta segunda fase del trabajo se consideraron únicamente las áreas de la provincia de Lugo que representan el 19,65 % de las áreas potenciales de Galicia determinadas en el proceso anterior.

La información sobre ciertos factores no cuantitativos que explican parte de las dinámicas de aplicación de cenizas, se recopiló a partir de entrevistas efectuadas en 2014 a investigadores especialistas de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Santiago de Compostela.

Los métodos de optimización se clasifican en clásicos (programación lineal, estocástica, dinámica, etc.) y heurísticos (inteligencia artificial que imitan fenómenos sencillos observados en la naturaleza). Los primeros garantizan un óptimo global mientras que los segundos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo local, aunque no siempre lo consiguen (Hillier 2010).

Se propone el siguiente modelo heurístico construido a partir de trabajo en campo y entrevistas con especialistas en el tema. Responde a una necesidad particular de optimizar los tiempos de traslado del centro de acopio al área de aplicación. El fundamento teórico se basa en relacionar el:

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Velocidad}}$$

El tiempo total empleado ( $t$ ), resulta de la suma del tiempo de traslado del centro de acopio al lugar de aplicación ( $C1$ ) y el tiempo requerido para el esparcimiento de las cenizas ( $C2$ ):

$$C1 = \left( \frac{DAP}{VT} \right)_{\max} \left[ \frac{(TP)(CA)}{CC} \right]$$

La  $C1$  medida en *horas* se construyó a partir del tiempo que tarda un vehículo en trasladar a una velocidad ( $VT$  en  $km\ h^{-1}$ ) cierta cantidad de cenizas ( $CC$  en  $t$ ) desde el centro de acopio al lugar de descarga, que es el punto más cercano al monte hasta donde el camión puede llegar sin poner en peligro su integridad ( $DAP$  en  $km$ ). Multiplicado por el número (entero máximo) de vehículos que se requieren para cubrir toda el área ( $TP$  en  $ha$ ) dada una cantidad constante de aplicación por hectárea ( $CA$  en  $t\ ha^{-1}$ ) (Tabla 1):

$$t = (C1) + (C2)$$

Para la  $C2$  medida en *horas* se consideraron, de acuerdo con expertos en la aplicación de cenizas de la Universidad de Santiago de Compostela, factores de campo que aumentan el tiempo de aplicación. Bajo el supuesto de que si se cumplen las condiciones idóneas para la aplicación de cenizas, el tiempo arrojado por la  $C2$ , estará dado por el tamaño de la parcela ( $TP$  en  $ha$ ) entre una velocidad constante de aplicación ( $VA$  en  $ha\ hr^{-1}$ ). De acuerdo con expertos los factores restrictivos que más limitan la velocidad de aplicación son la poda de árboles ( $PA$ ), marco de plantación ( $MP$ ), control de malezas ( $CM$ ), afloramiento rocoso ( $AR$ ), pendiente ( $P$ ), distancia del centro de descarga al monte ( $DDP$ ), irregularidad del monte ( $IP$ ) y tipo de maquinaria a emplear ( $TM$ ).

Por la dificultad de cuantificar los factores restrictivos en campo, se categorizaron como se muestra en la tabla 1. A medida que algún factor restrictivo aumente, el tiempo de aplicación se incrementará:

$$C2 = \frac{[TP][((PA)(MP)(CM)(AR))((0.2)(P) + (0.6)(DDP) + (0.1)(IP) + (0.1)(TM))]}{VA}$$

El factor restrictivo que más influye en el tiempo de aplicación, es la distancia del centro de descarga (donde el camión deja las cenizas) a la parcela donde con auxilio de tractores se hace el reparto ( $DDP$ ), en virtud de ello se le dio una ponderación de 0.6 (Comunicación personal Dr. Merino, 2014).

Por consiguiente los costos totales de aplicar cenizas ( $CT$ ) medidos en €, resultan de la suma del tiempo de traslado del centro de acopio al lugar de aplicación ( $C1$  en  $h$ ) por el coste de transporte ( $CTR$  en  $\text{€}\ h^{-1}$ ) más el tiempo requerido para el esparcimiento de las cenizas ( $C2$  en  $h$ ) por los costes de aplicación ( $CAP$  en  $\text{€}\ h^{-1}$ ):

$$CT = (C1)(CTR) + (C2)(CAP)$$

### Construcción del Índice de viabilidad económica por hectárea

El modelo anterior establece los costos totales ( $CT$ ) en función de los costos de transporte y de aplicación de cenizas por los tiempos requeridos en cada caso. Para la construcción del índice de viabilidad económica por hectárea ( $IVE_h$ ) dado en  $\text{€}\ ha^{-1}$  se consideró, conforme opinión de expertos como el Ing. Fernando Basurto del grupo empresarial ENCE, que el costo de aplicación ( $CAP$ ) dadas las condiciones idóneas en monte es de  $300\ \text{€}\ ha^{-1}$ .

$$IVE_h = \frac{CT}{TP}$$

De tal forma que la optimización de la función, está dada por:

$$\min IVE_h = \frac{\min(CT)}{TP} = \frac{\min[(C1)(CTR)] + \min[(C2)(CAP)]}{TP}$$

El  $\min[(C1)(CTR)]$  se logra cuando la  $DAP$  es 0, lo que implica que no existe  $CTR$ . Mientras que el  $\min[(C2)(CAP)]$  se alcanza cuando todos los factores restrictivos de campo son idóneos para la aplicación, en cuyo caso el  $CAP$  es 300 € ha<sup>-1</sup>. Por tanto el índice de viabilidad económica por hectárea tendrá como límite inferior a 300.

Componente	Variables	Unidad
Componente 1 (C1 en h)	Distancia del acopio al monte forestal ( $DAP$ )	km
	Velocidad del transporte ( $VT$ )	km hr <sup>-1</sup>
	Tamaño del monte ( $TP$ )	ha
	Cantidad a aplicar ( $CA$ )	10 t ha <sup>-1</sup>
	Capacidad del camión ( $CC$ )	24 t
Componente 2 (C2 en h)	Tamaño del monte ( $TP$ )	ha
	Poda de árboles ( $PA$ )	1: Existe; 2: De otra forma
	Marco de plantación ( $MP$ )	1: 3x4m; 2: De otra forma
	Control de Malezas ( $CM$ )	1: Existe; 2: De otra forma
	Afloramiento Rocoso ( $AR$ )	1: No existe ; 2: De otra forma
	Pendiente promedio en el monte ( $P$ )	1: 0-10 %; 2: 11-20 %; 3: 21-25%
	Distancia del centro de descarga al monte ( $DDP$ )	1: 0-50 m; 2: 51-100 m; 3: 101-200 m
	Irregularidad del monte ( $IP$ )	1: Parecido a un cuadrado; 2: De otra forma
	Tipo de maquinaria ( $TM$ )*	1: Excelente (1,1); 2: Muy Buena (1,0) ; 3: Buena (0,1); 4: Aceptable (0,0)
	Velocidad de aplicación ( $VA$ )	0.125 ha hr <sup>-1</sup> (1 ha por 8 hr)
Coste	Transporte ( $CTR$ )	12 € hr <sup>-1</sup>
	Aplicación ( $CAP$ )	37.5 € hr <sup>-1</sup> (300 € ha <sup>-1</sup> / 1 ha 8 hr <sup>-1</sup> )
	Total	€1 0000 + €2 0000

\*Consideración: Antigüedad (1: 0-3 años, 0: Mas de 4 años) y capacidad de transporte (1: Mas de 1000 kg; 0: Menos de 1000 kg)

**Tabla 1.-** Variables propuestas para el desarrollo del modelo que minimiza tiempos de operación. Construidas a partir de entrevistas con expertos y trabajo de campo

Técnicamente si alguna de las variables poda de árboles ( $PA$ ), marco de plantación ( $MP$ ), control de malezas ( $CM$ ) y afloramiento rocoso ( $AR$ ) es 0 implica que no se puede aplicar cenizas a esa área. Sin embargo teóricamente significa que el costo de aplicación se incrementa, al igual que si alguno de los otros factores restrictivos no es el idóneo. Por tanto el índice de viabilidad económica por hectárea tendrá como límite superior a. Matemáticamente el  $IVE_h$  es un elemento del intervalo que va de 300 a; sin embargo por información de campo, se propone como límite superior a 500. El criterio de decisión para determinar si un área es económicamente más viable que otra, será cuando su  $IVE_h$  sea más cercano a 300.

### Optimización de las rutas de transporte

Optimizar el modelo para obtener el  $IVE_h$  implica minimizar las  $DAP$ , para ello se empleó la herramienta *network analyst de ArcGis* (Barrientos 2007) y la red de carreteras nacional, autonómica y provincial del IGN (2014). El objetivo es encontrar las rutas más cortas entre el centro de acopio y las áreas de aplicación, dada una red de carreteras.

Las  $DAP$  para las diferentes áreas en la provincia de Lugo, se obtuvieron mediante la herramienta *route / impedance* (distancia en km) de *network analyst* siguiendo la metodología descrita por Barrientos (2007), previa corrección de la red de carreteras por *topology / must not have dangles*. Para contrastar los resultados se calcularon

las rutas para dos centros de acopio distintos ubicados en los municipios de Lugo y As Nogais, la selección de estos centros estuvo en función de la disponibilidad para realizar las verificaciones en campo. En cada caso se estimó el  $IVE_n$  por área de aplicación. Se consideró una velocidad constante de 60 km hr<sup>-1</sup> conforme la ley de tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial de la Dirección General de Tráfico (DGT 2014), para transporte con capacidad de 24 t. Los valores de los factores restrictivos para C2 se obtuvieron de visitas a campo y opinión de expertos de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Santiago de Compostela.

Finalmente para comparar la bondad de estimación del  $IVE_n$  obtenido por el modelo heurístico propuesto y la herramienta *route* de *network analyst*, se aplicó la opción *location – allocation / minimize impedance* considerando los dos centros de acopio. Esta opción busca instalaciones (centros de acopio) de modo que suministren a los puntos de demanda (áreas de aplicación) de la manera más eficiente, considerando en este caso la distancia más corta; el centro de acopio no necesariamente debe ser el mismo para todos los puntos de demanda (Barrientos 2007).

conforme el artículo 12 del decreto 125/2012 de la Xunta de Galicia. De las 11.957 ha originales solo 8.303 ha son factibles para la aplicación de cenizas, se distribuyen en 1.277 rodales agrupados en 169 montes forestales (Tabla 2).

El tamaño y forma de los rodales y montes se modificó. Las áreas obtenidas mediante esta metodología garantizan que la aplicación de cenizas de cumplimiento a las restricciones ambientales y sociales. El uso de los SIG en la gestión del territorio de acuerdo con Peña (2006) reduce la cantidad de tiempo y recursos empleados en la consecución de objetivos, al facilitar complejos procesos de análisis de información espacial. Sin embargo también presenta limitantes técnicas, operacionales, económicas, burocráticas, culturales y sociales que influyen en la calidad de información procesada y obtenida (Moreno 2010). De ahí la importancia de complementar y comprobar la información generada mediante los SIG con información de campo para minimizar los sesgos.

Accesibilidad y logística de aplicación de cenizas a montes forestales de Lugo: Optimización de las rutas de transporte y construcción del  $IVE_n$

## Resultados y discusión

Factibilidad para la aplicación de cenizas en las áreas forestales de Galicia

La figura 1 muestra la delimitación de la factibilidad para la aplicación de cenizas en las áreas forestales de Galicia

Para la optimización de las rutas más cortas entre el centro de acopio y las áreas de aplicación, dada la red de carreteras, se consideraron dos centros de acopio ubicados en los municipios de Lugo y As Nogais; y once montes forestales o puntos de demanda distribuidos espacialmente en la provincia de Lugo.

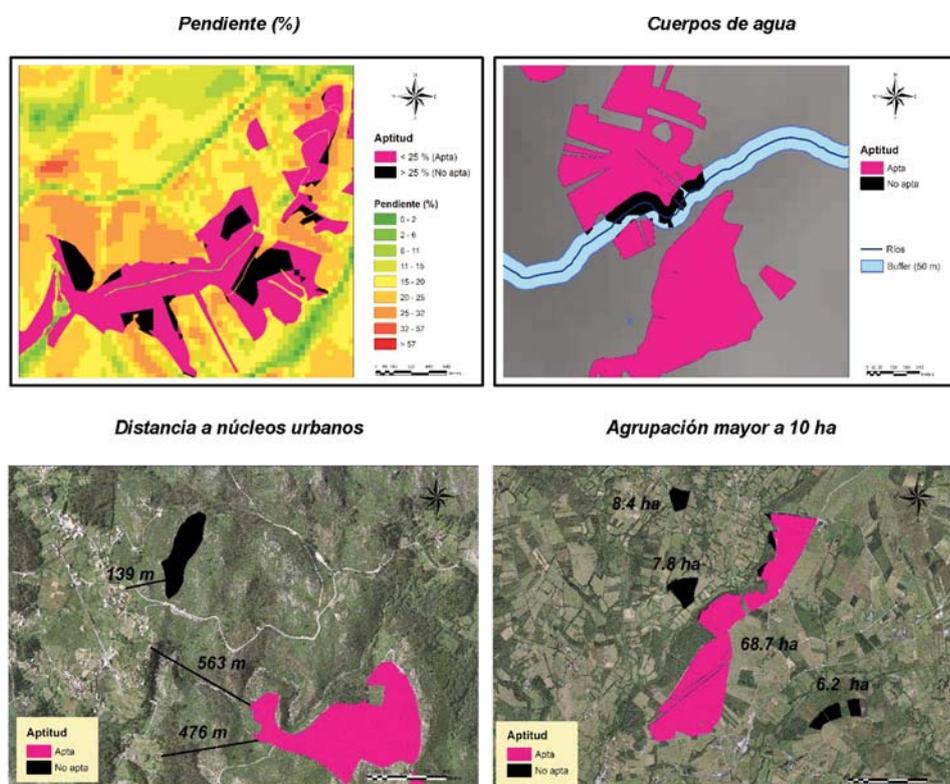


Figura 1.- Factibilidad de las áreas forestales en Galicia, delimitadas de acuerdo a las restricciones enmarcadas en el artículo 12 del decreto 125/2012 de la Xunta de Galicia

Comunidad Autónoma	Provincia	Originales			Factibles		
		Montes	Rodales	Area (ha)	Montes	Rodales	Area (ha)
Galicia	Coruña	92	598	3.605	60	486	3.136
	Lugo	120	369	2.472	11	206	1.632
	Ourense	3	13	155	3	11	143
	Pontevedra	103	611	3.808	95	574	3.392
Total		318	1.591	10.040	169	1.277	8.303

**Tabla 2.-** Relación de superficies originales con superficies factibles conforme el artículo 12 del decreto 125/2012 de la Xunta de Galicia

La tabla 3 muestra las distancias más cortas entre los centros de acopio y los montes (*DAP*), obtenidas mediante *route de network analyst*, así como los índices de viabilidad económica por hectárea en cada monte ( $IVE_h$ ). Este índice se construyó a partir de las distancias mínimas, modelo heurístico, supuestos y restricciones antes descritos. Los  $IVE_h$  más próximos a 300 son los obtenidos para el centro de acopio del municipio de Lugo, por tanto este acopio es económicamente más viable para el traslado de cenizas a los montes de aplicación que el ubicado en As Nogais.

El  $IVE_h$  permite establecer la logística de abasto priorizando aquellos montes con costos menores. Partiendo del centro de acopio ubicado en Lugo, la prioridad de aplicación son los montes: 5, 4, 9, 3, 11, 7, 2, 8, 10, 1, y 6, puesto que los primeros son de menor costo que los últimos. En la figura 2 se muestra que la prioridad no necesariamente está en

relación con la proximidad o lejanía física al centro de acopio. Al respecto Chias *et al.* (2001) habla de accesibilidad entendida como la distancia geográfica y las características físicas, económicas y sociales del usuario y servicio demandado. Por ello los factores restrictivos de la componente 2 (*C2*) del modelo heurístico determinan el  $IVE_h$ , en especial la distancia del centro de descarga al monte (*DDP*).

Laporte (1992) habla de la importancia de los modelos heurísticos en el análisis de rutas óptimas, al responder a necesidades específicas. Al respecto Gómez *et al.* (2001) considera que la introducción de características físicas de los centros de acopio y lugares de vertederos es imprescindible en el cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos.

Monte	Tamaño Monte (TP)	P	DDP	IP	TM	Lugo		As Nogais	
						DAP	$IVE_h$	DAP	$IVE_h$
1	15,1	1	3	1	1	48,2	663,3	101,0	667,0
2	10,6	2	2	2	1	35,9	572,5	50,2	573,5
3	196,1	3	1	2	1	51,9	453,3	71,6	454,5
4	42,2	2	1	2	1	61,2	393,9	80,3	395,1
5	75,7	1	1	2	1	90,7	335,8	109,3	336,9
6	52,8	1	3	2	1	48,9	693,2	81,7	695,3
7	14,4	1	2	1	1	48,5	483,0	82,1	485,2
8	73,3	2	2	2	1	45,4	572,9	87,8	575,6
9	73,5	2	1	2	1	88,7	395,6	143,1	399,1
10	109,6	2	2	2	1	89,2	575,6	118,8	577,5
11	968,3	3	1	2	1	94,8	455,9	126,8	457,9

Los factores restrictivos Poda de Árboles (PA), Marco de Plantación (MP), Control de Malezas (CM), y Afloramiento Rocoso (AR) tomaron el valor de 1

**Tabla 3.-** Distancias más cortas de las rutas por carretera del centro de acopio a los montes forestales (*DAP*) e índice de viabilidad económica por hectárea ( $IVE_h$ ) considerando los valores restrictivos obtenidos en campo: Pendiente promedio en el monte (P), Distancia del centro de descarga al monte (DDP), Irregularidad del monte (IP) y Tipo de maquinaria (TM)

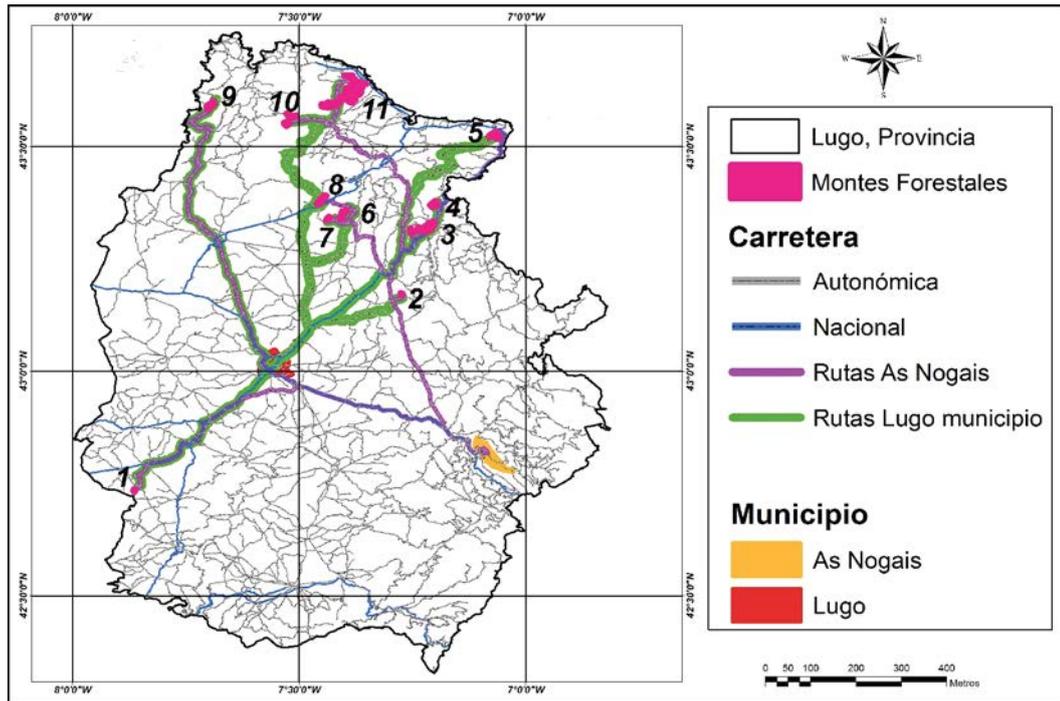


Figura 2.- Trazado de las rutas de transporte que minimizan las distancias de los centros de acopio a los montes forestales en la provincia de Lugo, obtenidas mediante la herramienta route de network analyst

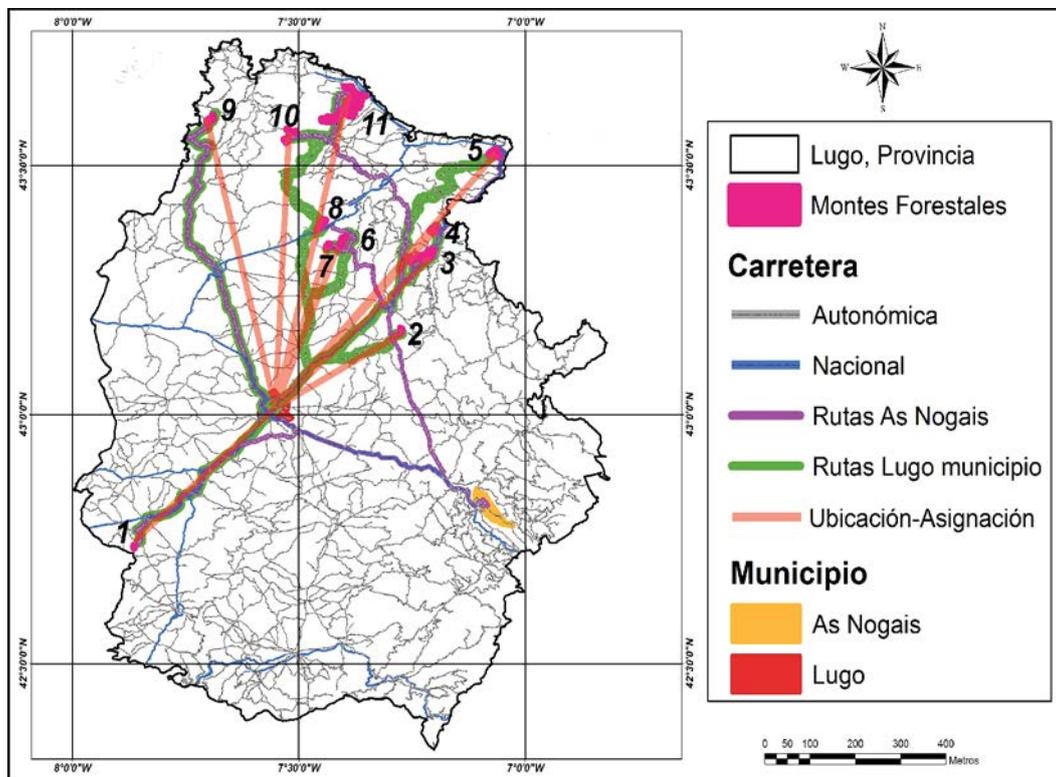


Figura 3.- Trazado de las rutas de transporte que minimizan las distancias de los centros de acopio a los montes forestales en la provincia de Lugo, obtenidas mediante la herramienta route de network analyst

Finalmente para comprobar la bondad de estimación del  $IVE_h$  obtenido por el modelo heurístico y la herramienta *route de network analyst*, se aplicó la opción *location – allocation / minimize impedance* considerando los dos centros de acopio y los once montes forestales. La figura 3 muestra que al igual que en el  $IVE_h$  el mejor centro de acopio es el ubicado en el municipio de Lugo. Sin embargo la prioridad en la logística de aplicación de cenizas está dada por los montes: 2, 6, 8, 1, 7, 3, 4, 10, 5, 11, 9 al ser el único factor restrictivo la distancia geográfica. De ahí la importancia de considerar un modelo heurístico que responda a necesidades específicas (Laporte 1992)

Diferentes trabajos, por ejemplo Bosque *et al.* (2006) y Buzai *et al.* (2008) describen la utilidad de la herramienta *location–allocation* en la asignación de instalaciones que suministran productos o servicios a ciertos puntos de demanda de la manera más eficiente, bajo ciertas restricciones. La importancia de aplicar esta herramienta en el presente estudio, radica en el criterio de decisión que se tendría al reubicar e incrementar los centros de acopio y a partir de ellos asignar los montes forestales más cercanos. Complementar este análisis con el cálculo del  $IVE_h$  optimizaría la logística de aplicación de cenizas, al priorizar los montes forestales en función de los costes económicos partiendo de diferentes centros de acopio.

## Conclusiones

El modelo heurístico planteado ayuda a redirigir el foco de atención y por tanto recursos hacia aquellas superficies con un mayor potencial de viabilidad y accesibilidad. El uso de herramientas de sistemas de información geográfica en la determinación de factibilidad, accesibilidad y logística para la aplicación de cenizas a áreas forestales, facilita la toma de decisiones al restringir y disminuir superficies no aptas bajo ciertos criterios, minimizando los costes de operación. Sin embargo se debe considerar la limitación de los SIG ante factores como el desbroce, la pedregosidad, marco de plantación, aptitud para mecanización e incluso el estado de fertilización de los suelos, en virtud de ello es necesario complementarlos con trabajo de campo a través de visitas previas, tomas de muestras y análisis de suelos.

## Consideraciones

El modelo heurístico desarrollado plantea el cálculo de costes de transporte y aplicación de cenizas en plantaciones mayores a 1 año como mínimo. No contempla los insumos empleados en poda de árboles (PA) y control de malezas (CM), los cuales se minimizan al aplicar la ceniza en el momento de la plantación. La ceniza ayuda a una mejor madurez fisiológica si se aplica en el momento de la plantación (Comunicación personal Dra. Omil, 2014). Se consideraron variables binarias porque en campo normalmente no se categoriza su impacto, sino si existe o no existe, al igual que el marco de plantación (MP) y el afloramiento rocoso (AR).

**Agradecimientos** Al proyecto “*Generación de fertilizantes a partir de cenizas de biomasa*”. Investigador principal: A. Merino. Entidad

financiadora: FEADER-Xunta de Galicia (Cooperación para el desarrollo de nuevos productos, procesos y tecnologías en el ámbito agroalimentario, agrícola o forestal). Período: 2 años (1-9-2013/31-08-2015).

## Referencias

- Barrientos, M.A. (2007). *Network Analyst: El Análisis de redes desde ArcGIS 9.2*. Disponible en: [http://www.gabrielortiz.com/descargas/Network\\_Analyst\\_9\\_2.pdf](http://www.gabrielortiz.com/descargas/Network_Analyst_9_2.pdf) [3 enero, 2014].
- Bosque, S.J., Gómez, D.M. & Palm, R.F. (2006). Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG. *Cuadernos Geográficos*. 39, 2: 53-68.
- Buzai, D. & Baxendale, C. (2008). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: Análisis espacial de escuelas EGB en la ciudad de Luján. *Revista Universitaria de Geografía*. 17: 233-254.
- Chias, B.L., Iturbe, P.A. & Reyna, S.F. (2001). Accesibilidad de las localidades del Estado de México a la red carretera pavimentada: un enfoque metodológico. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 46: 117-130.
- DGT (Dirección general de tráfico) (2014). *Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial* (Última modificación 8 de abril de 2014). Disponible en: <http://www.boe.es/buscar/pdf/1990/BOE-A-1990-6396-consolidado.pdf> [5 julio, 2014].
- DOG (Diario Oficial de Galicia) (2012). Decreto 125/2012, de 10 de mayo, por el que se regula la utilización de lodos de depuradora en el ámbito del sector agrario en la Comunidad Autónoma de Galicia. Disponible en: [http://www.xunta.es/dog/Publicados/2012/20120606/Anunci oC3C1-300512-0002\\_es.html](http://www.xunta.es/dog/Publicados/2012/20120606/Anunci oC3C1-300512-0002_es.html) [23 febrero, 2014].
- Fischer, M. (2003). GIS and network analysis. En: *Handbook 5 Transport Geography and Spatial Systems*.
- Gómez, D.M. & Bosque, S.J. (2001). Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos. *GeoFocus* 1: 49-75.
- Hillier, F.S. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. 9ª edición. McGraw Hill.
- IGN (Instituto Geográfico Nacional) (2014). Centro de descargas del centro nacional de información geográfica. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.js> [23 abril, 2014].
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview. *European Journal of Operational Research*. 59: 345-358.
- López, B.J., Olguín, T.J. & Camargo, W.C. (2008). Modelo matemático de transporte aplicado a una compañía dedicada a la manufactura y distribución de juguetes, usando programación lineal entera. *Revista Ingeniería Industrial*. 7, 2: 65-72.

- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente) (2014). Servicios y cartografía SIG. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/> [11 mayo, 2014].
- Merino, A., Rey, C., Brañas, J. & Rodríguez-Soalleiro, R. (2003). Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don de Galicia. *Inv. Agr.: Sist. Rec. For.* 12:85-89.
- Moreno, C.L. (2010). Factores de éxito o fracaso de los SIG. *Revista Ingeniería Hoy.* 32: 39-47.
- Omil, B. (2007). Gestión de cenizas como fertilizante y enmendante de plantaciones jóvenes de *Pinus radiata*. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Omil, B. Piñeiro, V. & Merino, A. (2013). Soil and tree responses to the application of wood ash containing charcoal in two soils with contrasting properties. *Forest Ecology and Management.* 295:199–212.
- Peña, J.P. (2006). Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio. *Revista de geografía Norte Grande.* 36: 97-101.
- Santalla, M., Omil, B., Rodríguez-Soalleiro, R. & Merino, A. (2011). Effectiveness of wood ash containing charcoal as a fertilizer for a forest plantation in a temperate region. *Plant Soil.* 346:63–78.
- Solla-Gullón, F., Rodríguez-Soalleiro, R. & Merino, A. (2004a). Respuesta de plantaciones forestales jóvenes sobre suelos ácidos a la fertilización con cenizas de biomasa. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 20:227-232.
- Solla-Gullón, F., Taboada, M.P., Rodríguez-Soalleiro, R. & Merino, A. (2004b). Respuesta inicial del aporte de cenizas de biomasa arbórea en el estado nutricional de una plantación joven de *Pinus radiata* D. Don. *Invest Agrar Sist Recur For.* 13, 2: 281-293.
- Solla-Gullón, F. (2004c). Aplicación de cenizas de biomasa arbórea como fertilizante y encalante de plantaciones forestales en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Xie, F. & Levison, D. (2009). Modeling the Growth of Transportation Networks: A Comprehensive Review. *Netw Spat Econ.* 9:291–307.
- Zas, R. & Serrada, R. (2003). Foliar nutrient status and nutritional relationships of Young *Pinus radiata* D. Don plantations in northwest Spain. *Forest Ecol. Manag.* 174:167-176.