

UNIVERSIDAD DE OVIEDO
ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*“Análisis de la Potencialidad Productiva en
Plantaciones Energéticas mediante Sistemas de
Información Geográfica (Estudio en Cantil I,
Langreo)”*

Autor: Natalia Ferreira Losa
Tutor: Pedro Álvarez Álvarez

Julio, 2013

Índice

Resumen/Abstract	2
Introducción	3
Búsqueda de alternativas energéticas	3
La política energética	4
La biomasa forestal	4
Cultivos energéticos	5
Mejora genética de algunas especies forestales.....	6
Objetivos	8
Material y Métodos	9
Dispositivo experimental.....	9
Métodos de estudio de la información	15
Resultados y Discusión.....	19
Niveles de fertilización	19
Producción de los clones utilizados.....	23
Análisis del clon más productivo	26
Poder calorífico de la plantación.....	34
Estimación del poder calorífico del clon <i>Monviso</i> en toda la plantación mediante un análisis de regresión múltiple.....	36
Conclusiones.....	42
Bibliografía.	

ANEXO I. Plano final: “Estimación del poder calorífico (MJ) de la plantación con el clon Monviso”

ANEXO II. Datos edáficos y de crecimiento.

Resumen

En los últimos años los Sistemas de Información Geográfica han experimentado grandes avances, convirtiéndose en una parte muy importante en trabajos de todo tipo, entre los que se encuentran proyectos de aplicación puramente medioambiental, como es el caso de los cultivos energéticos de corta rotación (*Short Rotation Forestry*, *SRF*, en terminología anglosajona).

El desarrollo de este tipo de cultivos supone un recurso energético muy interesante y es en estos momentos uno de los objetivos más ambiciosos dentro de las políticas sobre energías renovables en España y, en general, en la Unión Europea.

Por todo ello, se ha visto la necesidad de aunar en un SIG los datos obtenidos de un dispositivo experimental de una plantación energética en Asturias, realizando con los mismos un estudio geoestadístico de la zona, del que se obtendrán resultados interesantes sobre el poder calorífico de este tipo de cultivos.

Palabras Clave: cultivo energético, SIG, biomasa, producción, *Monviso*, biocombustible.

Abstract

During de last few years Geographic Information Systems have experienced great advances, becoming a very important part in all kind of works, including purely environmental application's projects, as in the case of short rotation forestry (SRF).

The development of these crops is an interesting energy resource and it is currently one of the most ambitious targets in renewable energy politics in Spain and, in general, in the European Union.

Therefore, it has seen the need to join the data obtained from an experimental energy plantation in Asturias into a GIS, made a geostatistical study of the area with them, obtaining interesting results on the calorific value of these crops.

Keywords: energy crop, GIS, biomass, production, *Monviso*, biofuel.

Introducción

Búsqueda de alternativas energéticas.

Con el **Protocolo de Kioto** se puso de manifiesto la necesidad de desarrollar alternativas energéticas para ayudar a reducir el cambio climático, uno de los problemas medioambientales más graves de la sociedad, especialmente en el último siglo. Con la firma y ratificación de dicho protocolo, los países firmantes se comprometieron, en 1997, a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e intentar alcanzar ciertos objetivos marcados por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

Una de las iniciativas más importantes para cumplir con dicho compromiso y que se ha convertido en uno de los aspectos claves de la política energética nacional e internacional, es la de potenciar el uso de energías alternativas, menos agresivas con el medio ambiente, que permitan implementar un programa eficaz y riguroso de eficiencia energética (Menéndez, 2011).

Las actuaciones se centran en este punto en el desarrollo de las energías renovables: se denomina energía renovable a la “*energía procedente de fuentes renovables no fósiles que se obtiene de las corrientes de energía continua o recurrentes del medio ambiente natural, y abarca tecnologías de no carbono*” (IPCC, 2008). Se pueden clasificar en: solar, eólica, hidroeléctrica, energías del mar, geotérmica y biomásica.

En el caso concreto de España, su dependencia de productos petrolíferos junto a una reducida aportación de recursos autóctonos, ha dado lugar a una elevada dependencia energética, lo que se traduce en un reducido grado de autoabastecimiento (IDAE, 2010), de ahí la tendencia a utilizar la **biomasa** como fuente de energía.

La biomasa es una de las fuentes energéticas renovables con mayor potencial de crecimiento durante las próximas décadas. En todo el mundo, la aportación actual de la biomasa (utilizando una definición amplia que incluye todas las fuentes de bioenergía y también los usos tradicionales no eficientes) se sitúa en torno al 10% del total de producción de energía. De acuerdo con previsiones establecidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), a lo largo del siglo XXI la biomasa va a desempeñar un papel fundamental en el abastecimiento energético con recursos renovables y su cuota de participación en la producción mundial de energía debería estar entre el 25% y el 46% (Cerdá, 2012).

La política energética.

Una de las más importantes apuestas por las energías renovables en España, donde la energía biomásica tiene un peso muy importante, fue la aprobación en 2005 del **Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010**, que se llevó a cabo junto con un Plan de Acción para la mejora de la eficiencia energética y cuyo objetivo era aumentar la implantación de este tipo de energías en España y ayudar a cumplir los objetivos que había marcado la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico, que pretendía alcanzar en 2010 un 12% del consumo de energía primaria a partir de fuentes renovables.

Al finalizar dicho Plan, era necesario el desarrollo de otro PER atendiendo al mandato establecido en la legislación vigente ^[1], éste con unos objetivos marcados más a largo plazo, con un periodo de vigencia de 2011 a 2020, incorporando en el mismo objetivos acordes con la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de fuentes renovables, la cual establece objetivos mínimos vinculantes para el conjunto de la Unión Europea y para cada uno de los estados miembros, y la necesidad de que cada Estado miembro elabore y notifique a la Comisión Europea (CE), a más tardar el 30 de junio de 2010, un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) para el periodo 2011-2020, con vistas al cumplimiento de los objetivos vinculantes que fija la Directiva. Por tanto, en este nuevo PER 2011 – 2020 se incluyen los elementos esenciales del PANER, así como otros análisis no contemplados en este último.

La biomasa forestal.

Esta alternativa supone un recurso energético interesante por varias razones (Hernández, 2006):

- Es renovable y podría ser desarrollado sosteniblemente en el futuro.
- Contribuye a la mitigación del cambio climático por su papel como sumidero de carbono.
- Posee unas características medioambientales favorables porque reduce el número de contaminantes en la atmósfera frente a los combustibles fósiles.
- Puede tener un potencial económico significativo frente al incremento del precio de los combustibles fósiles, beneficiando así la economía agraria.

[1] Real Decreto 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial y, posteriormente, Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible.

- Es fácil de almacenar, al contrario de lo que ocurre con las energías eólica y solar.
- Disminuye el riesgo de incendios y facilita su extinción: según la Confederación de Organizaciones de Selvicultores de España (COSE), si se valorizaran en plantas de biomasa los residuos forestales que permanecen en los bosques españoles, disminuiría entre el 50% y el 70% la superficie media incendiada cada año.

Además de estas ventajas medioambientales, también se le pueden atribuir otras, como el potencial de creación de empleo (según el informe IDAE de 2011, el conjunto del sector de las energías renovables creó en el año 2009 más de 115.000 puestos de trabajo en toda España) o el desarrollo económico de zonas rurales (Cerdá, 2011).

La biomasa forestal se puede utilizar para diversos usos; actualmente, los dos principales usos energéticos actuales son la generación eléctrica y la generación térmica (en el caso de la cogeneración, se consiguen los dos objetivos, obteniendo además eficiencias globales del ciclo muy elevadas). En el año 2010, el 83,2% de la producción de energía primaria (en tep) a partir de biomasa sólida en el conjunto de países de la UE correspondió a aplicaciones térmicas, y el 16,8% a aplicaciones eléctricas (Cerdá, 2012).

Un tercer uso que se pretende de la biomasa forestal es la conversión de ésta en biocarburante líquido (biodiesel o bioetanol de segunda generación), pero este último está aún en fases de desarrollo, ya que generalmente se utiliza biomasa procedente de cultivos agrícolas, con la que se obtienen muy buenos resultados (CONAMA, 2008).

Cultivos energéticos.

Los cultivos energéticos son plantaciones que se realizan con el propósito específico de producir energía en alguna de sus tipologías, pero además suponen también una alternativa en tierras agrarias, con usos agrícolas y ganaderos cada vez más residuales y más mermados de subvenciones europeas o bien, un incentivo para las industrias, como por ejemplo las centrales térmicas, que pueden encontrar en la co-combustión una alternativa importante en la reducción de las necesidades de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (Tharakan et al, 2005).

Las especies o variedades vegetales de interés para su empleo como cultivos energéticos deben ser de crecimiento rápido, bien adaptadas estacionalmente al sitio de introducción (Sims et al., 2001; citado en Cámara, 2008), con buena propagación vegetativa y máximas producciones de biomasa con turnos cortos. Evans (1992; citado en Cámara, 2008)

recomienda probar especies autóctonas en los ensayos y, en el caso de que los suelos pudieran ser limitantes para su crecimiento, incluir tratamientos que corrijan estas deficiencias.

En la última década han cobrado especial importancia los cultivos forestales de corta rotación (*Short Rotation Forestry*, SRF, en terminología anglosajona), que son aquellos en los que se utilizan especies de crecimiento rápido, bajo un sistema de manejo intensivo y con un turno de corta entre los 2 y 10 años (Makeschin, 1999; Weith, 2004; citados en Sixto et al., 2007), con el fin de conseguir producciones elevadas al mismo tiempo que se atienden otras características de interés para el cultivo en alta densidad, como por ejemplo resistencia a plagas y enfermedades, capacidad de rebrote tras la corta, etc.

Todos estos aspectos requieren importantes esfuerzos de mejora genética, de tal forma que se consiga la idoneidad del material para el uso requerido. A través de las técnicas de mejora clásica y en la actualidad también con la ayuda de la biotecnología, se han realizado importantes avances que permiten obtener cada vez materiales más adecuados (Menéndez, 2011).

Mejora genética de algunas especies forestales.

Populus sp.:

La mejora genética del chopo en España ha resultado ser una prioridad en el mundo forestal desde hace ya muchos años debido a su fácil cultivo y a sus magníficos resultados. Los métodos de hibridación se han ido mejorando y en 2005 se creó una nueva colección de chopos híbridos con unas importantes características de adaptabilidad, y mejoradas después con técnicas de propagación in vitro (FAO, 2008).

Entre toda la oferta clonal de álamo, Sixto (2007) destaca diferencias significativas en los clones AF2 y *Monviso* en turnos de rotación cortos. Cabe destacar también que se ha realizado una mejor adecuación en híbridos de *Populus x generosa*, cuyos ensayos en Reino Unido han dado como resultado, en su primera rotación y a un turno de 2 años, un volumen de biomasa de 9,6 kg M.S./ha·año, para una densidad de 10.000 pies/ha (Proe et al. 2002, citado en Sixto et al., 2007)

Salix sp.:

Las diversas especies de sauces se cruzan entre sí con gran facilidad (Ceballos y Ruiz de la Torre, 2001) y sus plantaciones para producir biomasa se establecen de manera fácil y eficiente (Smart et al., 2005). Además, con su crecimiento rápido y sus ciclos cortos, pueden

absorber el exceso de nitrógeno y de fósforo derivado de las actividades agrícolas (*Adegbidi et al.*, 2001, citado en *Smart et al.*, 2005).

Es imposible hablar de hibridación de sauces en Europa y no hablar de Suecia. Dicho país se coloca a la cabeza del desarrollo de genotipos de sauce mejorados, en los que lleva trabajando desde 1975, principalmente con *Salix viminalis* y *Salix dasyclados* (Cerrillo, 2009).

En un marco más internacional, es importante destacar que en Estados Unidos se está llevando a cabo un programa para la mejora genética de esta especie: el programa SUNY-ESF, que desde 1994 ha conseguido más de 730 accesiones de *Salix* sp., la mayoría recolectadas y propagadas a partir de plantas en su hábitat natural, utilizando tecnología genética molecular basada en la variación de secuencias de ADN para comprobar la diversidad genética de las accesiones de la colección, para identificar clones específicos y como ayuda para la identificación de especies (*Smart et al.*, 2005).

Betula sp.:

En este sentido, el abedul se encuentra aún en fase de estudio en España, pero está claro que ofrece una alternativa interesante para las plantaciones en corta rotación (*Vande et al.*, 2007) debido a su rápido crecimiento y su buena adaptación a suelos pobres.

En un contexto más internacional, la oferta clonal del abedul se ha incrementado en los últimos años gracias a trabajos como el de Maarit Valjakka en Canadá (2000), que consiguió importantes avances en la hibridación de abedules utilizando técnicas genéticas innovadoras, o los trabajos realizados en Finlandia mediante métodos de criopreservación [²] y micropropagación [³] (*Ryynänen, L.; Aronen, T.*; 2005).

[²] Micropropagación: desarrollo de líneas clonales a partir de pequeñas muestras de tejidos como yemas, raíces o embriones extraídos de las semillas.

[³] Criopreservación: se recogen pequeñas muestras de tejidos y se mantienen a temperaturas muy frías para conservar su condición fisiológica actual.

Objetivos

En el presente trabajo, se utilizan datos de crecimiento, teniendo en cuenta inventarios dasométricos y de biomasa, y factores edáficos del suelo de una plantación energética, y se implementan en un entorno SIG.

Así, se dispone de toda la información de una forma conjunta, de modo que se puedan realizar análisis que amplíen la información de partida, como estudiar la información de forma geoestadística, teniendo en cuenta, no sólo los resultados obtenidos según clones o fertilización, sino también según su distribución en el territorio. Es decir, analizar la información temática y espacial al mismo tiempo, lo que supone una de las mayores ventajas en el uso de un SIG.

Con todos los datos se buscará analizar la biomasa obtenida y el poder calorífico estimado en relación a diversos factores edáficos y orográficos y plasmar además los resultados de un modo visual en mapas generados a partir de software SIG, de modo que se puedan interpretar fácilmente. También se procederá a realizar estimaciones del poder calorífico obtenido con el clon más productivo de la plantación, para lo que se utilizará software estadístico.

Material y Métodos

La manipulación de la información edáfica y productiva del dispositivo experimental, conlleva que, previamente, se especifique cómo se ha llevado a cabo la instalación del mismo, por lo que el procedimiento se dividirá en dos apartados importantes: **Dispositivo experimental** y **Métodos de estudio de la información**.

Dispositivo experimental

El dispositivo experimental instalado en la parcela “Cantil Norte”, también llamada “Cantil I”, forma parte de un proyecto más ambicioso, que comenzó en 2008, con la instalación de otro cultivo energético en terrenos restaurados de la mina “Mozquita Norte” (en el concejo de Langreo).

Esta segunda fase del proyecto llevada a cabo en el “Cantil Norte” pretende estudiar la capacidad de crecimiento que presentan determinadas variedades de especies forestales en las condiciones de suelo de escombrera, además de conocer la capacidad de producción de biomasa que presenta cada una de ellas. Esta iniciativa se debe a que los cultivos energéticos para la producción de biomasa suponen además una buena alternativa en tierras agrarias o, como es el caso del Principado de Asturias, en terrenos procedentes de explotaciones mineras (Cámara, 2008).

Este tipo de explotaciones, muy comunes en Asturias por su gran tradición minera, entrañan un gran impacto ambiental, no sólo por dejar un suelo ausente de vegetación y desprovisto de suelo orgánico, dónde la contaminación de las aguas subterráneas es muy probable, sino también porque conllevan un impacto visual muy negativo (Singh, 2002). Por todo ello, se convierten en unas zonas muy viables para el desarrollo de plantaciones energéticas, con el fin de, no sólo alcanzar las metas que se persiguen con una plantación de este tipo, sino también la restauración del terreno, confiriéndole su aspecto original.

Las especies elegidas para llevar a cabo el ensayo en Cantil I fueron chopo, sauce y abedul, elegidas por su capacidad para adaptarse a las condiciones físicas propias de una escombrera. Se utilizaron concretamente tres clones de chopo, dos de sauce, y planta de una savia de abedul:

- *Betula celtiberica*: Planta de una savia en cepellón.
- Género *Populus* (estaquillas):
 - *Populus x canadensis* - Clon AF2.
 - *Populus x canadensis* - Clon Monviso.
 - *Populus deltoides x trichocarpa* - Clon Beaupré.
- Género *Salix* (estaquillas):
 - *Salix viminalis* - Clon Tora.
 - *Salix alba* - Clon no definido.

La parcela seleccionada tiene una superficie de 3 ha y se encuentra situada en el Concejo de Langreo, con una altitud media aproximada de 450 m.



Figura 1. Localización de Cantil I en el concejo de Langreo

El dispositivo experimental cuenta con un diseño split-plot o de parcelas subdivididas, cada una de las cuales, 54 en total, tiene una superficie aproximada de 400 m² (20m*20m), y en las que se han considerado 3 factores cualitativos (bloque, clon y tratamiento). Para su establecimiento se han llevado a cabo los siguientes pasos ^[4]:

^[4] Todos los datos referentes al dispositivo experimental se obtienen de los informes anuales del mismo realizados en la Universidad de Oviedo bajo la supervisión de Asun Cámara Obregón y Marcos Barrio Anta.

- Preparar el terreno para el óptimo establecimiento de los clones y optimizar su tasa de supervivencia: se llevó a cabo un desbroce total y a hecho del matorral presente en la superficie, subsolado, gradeo y rotovateado.
- Aplicar una fertilización de fondo: el abonado de fondo se realizó antes del rotovateado, con NPK (8:24:16) en dosis de 500 kg/ha (mediante grada de discos).
- Replanteo de las parcelas y plantación manual: previamente a la plantación, tanto las estaquillas como la planta de abedul fueron micorrizadas con el fin de intentar mejorar la absorción de agua y sales minerales del suelo por parte de la planta, para lo que se utilizó una un gel tipo “slurrie” con una mezcla miceliar y esporal de endomicorrizar y hongos de los géneros *Pisolithus*, *Gastroderma*, *Laçaria* y *Boletus*.
- Instalación de los clones, identificando cada una de las subparcelas con un código (en 4 estaquillas de madera, una por vértice) según los factores cualitativos que le correspondan con el fin de evitar confusiones:

Tabla 1. Códigos utilizados.

Factores cualitativos	Niveles	Código
Bloque	Primer bloque	1
	Segundo bloque	2
	Tercer bloque	3
Clon	<i>Betula celtiberica</i> - Clon no definido	B
	<i>Populus x canadensis</i> – Clon AF2	Pa
	<i>Populus x canadensis</i> – Clon Monviso	Pm
	<i>Populus deltooides x trichocarpa</i> – Clon Beaupré	Pb
	<i>Salix viminalis</i> – Clon Tora	Sv
	<i>Salix alba</i> – Clon no definido	Sa
Fertilización	Nivel 1	F0
	Nivel 2	F1
	Nivel 3	F2

La plantación se realizó con estaquillas de tallo lignificadas, de brotes de un año, sanas, rectas y sin lesiones en la corteza, de unos 20 cm de longitud y entre 1,5 y 2 cm de diámetro. En el caso del abedul se empleó planta de 1 savia en envases de unos 300 cm³ de capacidad, que se introdujeron en el suelo tras realizar un hoyo con el plantamón.

Se siguió el esquema sueco de doble fila (figura 1) por ser el método más frecuente y con mejores resultados en este tipo de cultivos.

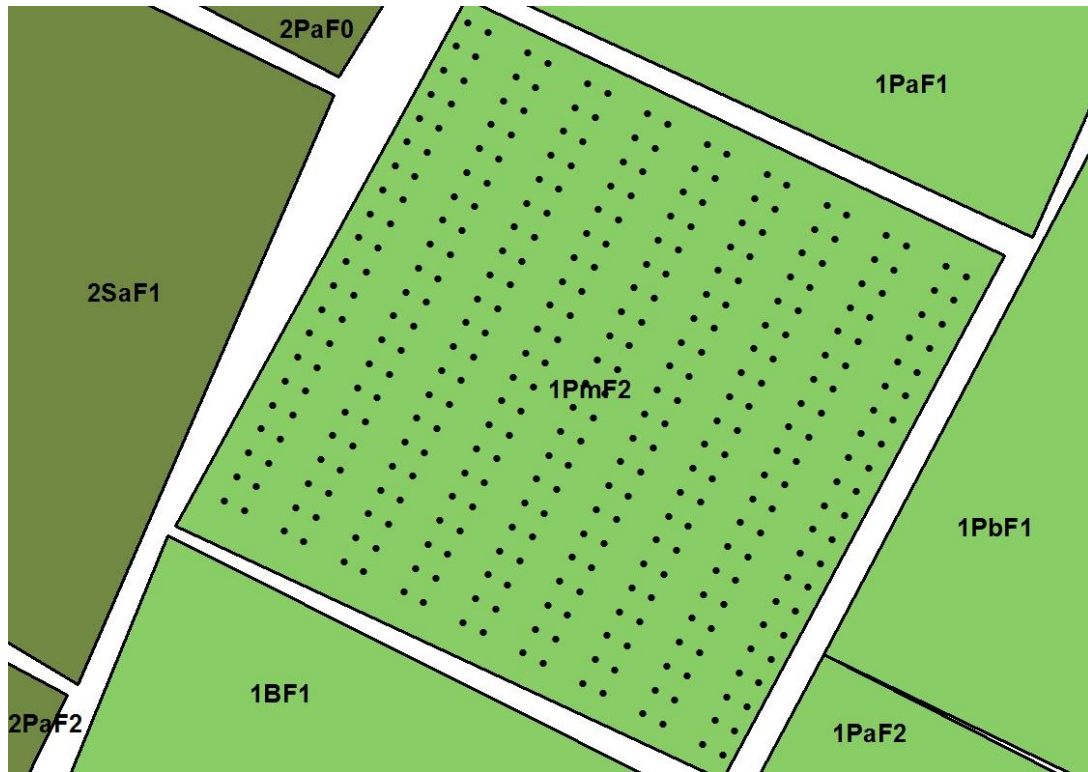


Figura 2. Esquema sueco de doble fila.

En todos los casos se empleó una densidad de 10.000 pies/ha. La separación entre dobles líneas es de 1,5 m, entre filas adyacentes, de 0,75 m y la distancia entre plantas es de 0,9 m:

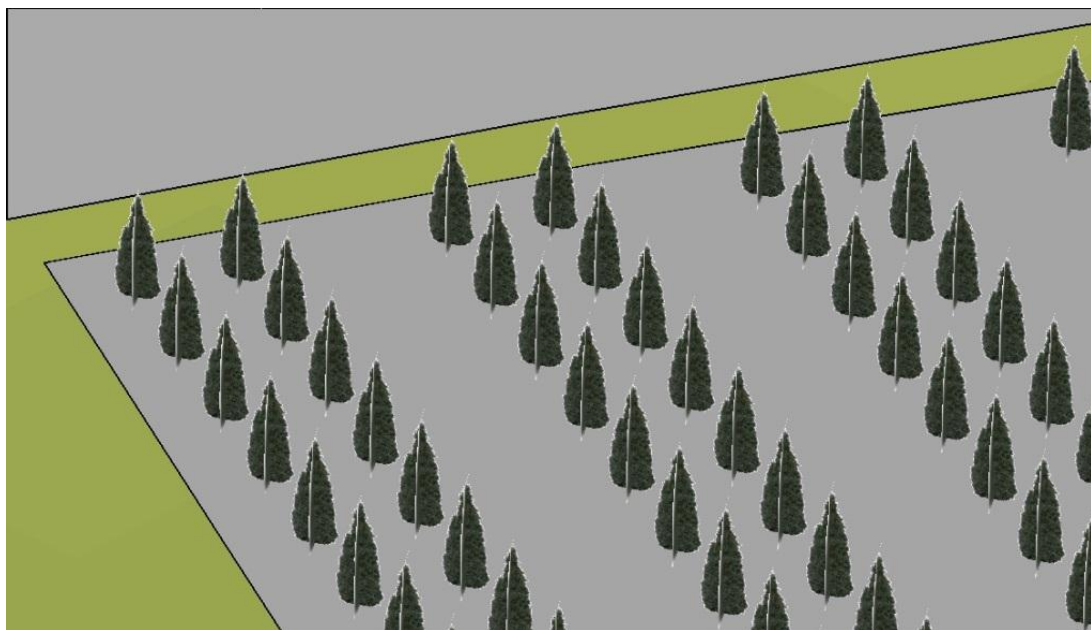


Figura 3. Detalle del esquema sueco de doble fila.

- Aplicación de tres niveles distintos de fertilización y herbicida:

Tabla 2. Niveles de fertilización y herbicida.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	
Fertilización	Sin fertilización adicional	80 kg/ha de Nitrato amónico (20-25% N)	160 kg/ha de Nitrato amónico (20-25% N)	Año 1
		300 kg/ha de NPK 6:20:12	600 kg/ha de NPK 6:20:12	Resto de años
Tratamiento herbicida	Sin tratamiento herbicida	Glifosato a ultrabajo volumen (4 l/ha).	Glifosato a ultrabajo volumen (4 l/ha).	

De ese modo, el diseño del cultivo queda de la siguiente manera:

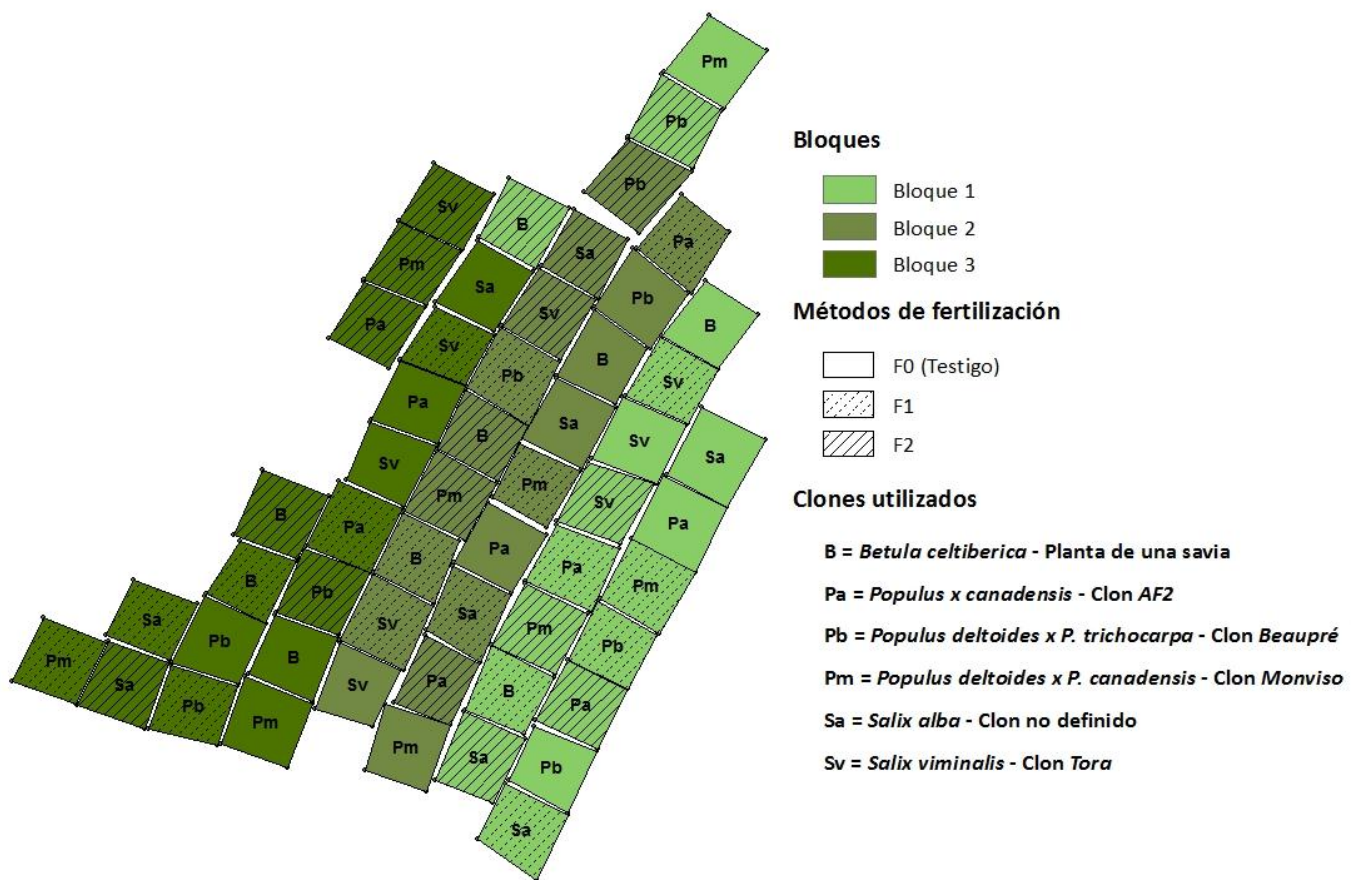


Figura 4. Dispositivo experimental en Cantil I.

Actuaciones realizadas en la plantación:

De acuerdo con la planificación inicial del ensayo, se han estado llevando a cabo, de manera periódica, análisis edáficos y foliares en laboratorio así como inventarios dasométricos con el fin de obtener información acerca de las características físico-químicas del suelo y para

determinar el crecimiento en volumen de cada uno de los clones instalados. **En este caso, el inventario que se utilizará para realizar el trabajo será el de 2011.**

Muestras edáficas.

En el caso de las muestras de suelo, éstas se comenzaron a recoger el mismo año de la instalación del cultivo, tomando 4 submuestras en cada una de las parcelas y distribuidas de manera aleatoria, siguiendo un recorrido en zig-zag, evitando los bordes, a una profundidad de 0-20 cm con la ayuda de una sonda holandesa consiguiendo de este modo abarcar la variabilidad de la parcela, para el posterior análisis en el laboratorio.

Crecimiento.

En cambio, para evaluar el crecimiento de los clones, se comenzaron a realizar los inventarios una vez transcurridos dos años del establecimiento del cultivo. Así, en los meses de marzo y abril de 2011 se midieron la altura total y el diámetro basal (se toma a una altura de 0,25 m sobre el punto de inserción) de 40 pies en cada una de las parcelas.

Para escoger esos 40 árboles se sigue siempre el mismo protocolo de medición: se comienza a medir por el octavo árbol de la quinta fila (primera de la tercera doble fila), se contabilizan ocho pies hacia el centro de la parcela y a continuación se repite lo mismo con las 4 filas siguientes.

Biomasa.

Las primeras muestras de biomasa se recogieron durante la primavera de 2011, siguiendo el siguiente protocolo: en cada una de las 54 parcelas se seleccionan 10 cepas de aspecto variable procurando así incluir toda la variabilidad de tamaños existente (para evitar el “efecto borde”, se evitan aquellos árboles pertenecientes a las filas que delimitan el contorno) y de ellos se cuantifica la biomasa en verde con una balanza de precisión y dividiendo la biomasa en las fracciones fina (diámetro < 0,5 cm), intermedia (diámetro entre 0,5 - 2 cm) y gruesa (diámetro > 2 cm).

De esta biomasa se recolecta una muestra por fracción y por cepa para proceder a su secado en laboratorio y así obtener el porcentaje de humedad y por tanto, el porcentaje de biomasa seca.

Métodos de estudio de la información

Para estudiar la información en software GIS, es necesario disponer de la información geográfica, es decir, la localización exacta de cada una de las parcelas, por lo que el primer paso es realizar en campo la toma de coordenadas (se toman las coordenadas de los 4 vértices de cada parcela mediante GPS). Una vez tomadas y anotadas dichas coordenadas, se realizan los pasos necesarios para su interpretación en GIS:

- Se pasan a una tabla alfanumérica y después se introducen en el software GIS elegido (el programa **ArcGis 10.0** en este caso).
- Se crean, mediante las herramientas necesarias, los polígonos en formato “*shapefile*” de cada una de las parcelas del ensayo.
- Se une el “*shapefile*” a la BD en la que se tienen todos los datos de 2011 obtenidos del análisis de suelo, variables dasométricas y biomasa de cada una de las parcelas del ensayo.

Una vez que se tiene la información en *ArcGis*, ya se puede pasar a estudiar, observando la relación entre diversas variables (para ello, se utiliza el programa estadístico **SPSS Statistics 17.0**) y creando mapas que visualicen dichas correlaciones y sean de fácil interpretación.

Para ello, se utilizan diferentes métodos estadísticos y algunos de ellos se aplicarán en el software GIS:

- Para estudiar la información individual de determinadas variables objeto de estudio, se recurrirá a sus **estadísticos descriptivos**, con los que se obtienen la media y la desviación estándar de los datos, además de otros estadísticos opcionales que se generarán en caso de que sea necesario.

De este modo, se tendrá una idea de la distribución de los datos en el terreno y de su grado de homogeneidad en el mismo.

- Otra forma de estudiar los datos, tanto de suelo como de producción, son los **gráficos**. En este caso, se optará por utilizar en los casos que sea necesario, diagramas de barras o **diagramas de caja**.

Estos últimos proporcionan una visión de la simetría de la distribución de datos mucho más clara que con los estadísticos descriptivos: estos diagramas están formados por una caja que representa el 50% de los datos y tiene una línea que representa la mediana, y dos brazos o bigotes, entre los que se encuentran distribuidos el primer y el cuarto cuartil.

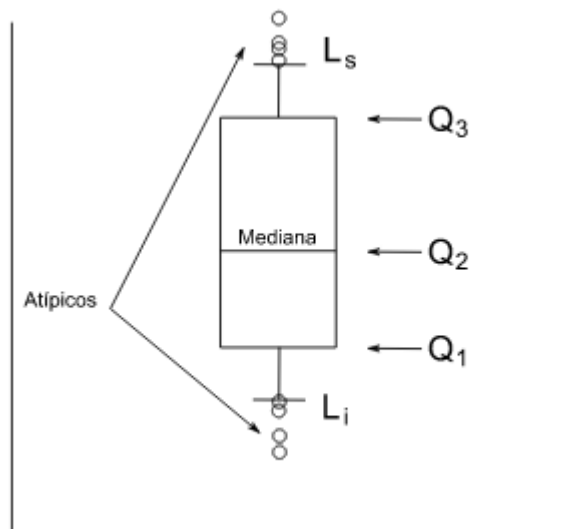


Figura 5. Ejemplo de un diagrama de caja.

- Por otro lado, para obtener la relación entre diversas variables se recurre a las **correlaciones bivariadas**.

La correlación mide la relación lineal entre dos variables y su sentido (si es directo o inverso); cuando la relación es perfectamente lineal el coeficiente de correlación vale 1 (ó -1 si la correlación es negativa), y cuando el coeficiente tiene un valor próximo a cero, o bien no existe correlación entre las variables analizadas o bien dicha correlación no es lineal. Hay diferentes métodos para estimar esta correlación:

- El coeficiente de correlación de *Pearson* se utiliza cuando ambas variables son cuantitativas siguiendo una distribución normal.
- El coeficiente de correlación de *Spearman* denotado por r_s se utiliza cuando alguna de las variables es ordinal o incluso dicotómica o para variables cuantitativas con muestras pequeñas.

Por la naturaleza de los datos de este trabajo y debido a que su distribución no es normal y que la muestra no es muy grande, en este caso se opta por utilizar el método de **Spearman**, que aplica una técnica no paramétrica en la que se utilizan los rangos de los valores en lugar de los valores originales.

En este caso, las primeras variables a estudiar serán las dasométricas, es decir, la altura de los pies, su diámetro basal, y el volumen estimado del fuste. Sin embargo, por tratarse de una plantación energética, lo que en realidad importa es el **poder calorífico** de la madera, que se define como “la cantidad de energía que se desprende en la combustión de un kilogramo de combustible sólido o líquido” (Hernández, 2007), y éste está directamente relacionado con el peso de la biomasa, y no con su volumen, además de con otros aspectos como la composición química de la madera y su contenido en humedad, ya que a mayor porcentaje de humedad menor será su PCI (poder calorífico inferior) y menor su inflamabilidad (Proupín, 1998).

Para ello, una de las propiedades más importantes a estudiar es la humedad de la madera, que puede variar mucho dependiendo de la especie, la ubicación de la plantación, el momento de recolección, etc. Para calcular esta humedad, se recurre a datos obtenidos en laboratorio y se crean nuevas variables utilizando la fórmula para la obtención de la humedad en base húmeda:

$$Humedad_{base-húmeda} = 100 \cdot \left(\frac{Peso_{Húmedo} - Peso_{Seco}}{Peso_{Húmedo}} \right)$$

Una vez obtenida la humedad, ya se puede calcular el poder calorífico neto de la biomasa a ese nivel específico de humedad ^[5], con lo que se obtendrá el poder calorífico total de la plantación. (FAO, 2004)

$$^{[5]} H_{u(w)} = [H_{u(wf)} \cdot (100 - w) - 2,44 \cdot w] / 100$$

donde w = es la humedad total de la madera en porcentaje.

$H_{u(wf)}$ = poder calorífico neto de la biomasa totalmente seca.

Además de todo esto, como se va a concluir qué clon ha sido más productivo en la plantación, también se llevará a cabo un **análisis de regresión** con *SPSS* que permita estimar en *ArcGIS* cuánta biomasa se habría obtenido con ese clon instalado en todo el dispositivo, y comprobar el incremento de poder calorífico que eso hubiera supuesto.

El análisis de regresión lineal múltiple permite establecer la relación que se produce entre una variable dependiente, en este caso la biomasa obtenida en campo, y un conjunto de variables independientes, que en este caso serán las cualidades físico-químicas de las parcelas.

- Con los datos de las correlaciones bivariadas entre las cualidades del suelo y la biomasa obtenida para el clon más productivo, se realiza el análisis con aquellos factores que se sabe que influyen en la producción de biomasa mediante el método “Introducir” y se estudian los resultados para comprobar si el ajuste es bueno o si, por el contrario, hay que llevar a cabo un método distinto en la búsqueda de dicha ecuación de regresión.

Una vez elegida la mejor ecuación de regresión, se aplica ésta en *ArcGIS*, y después se multiplica dicha estimación de biomasa por el poder calorífico medio del clon en cuestión para así obtener el poder calorífico total de la plantación en ese caso.

Resultados y Discusión

En el presente apartado se estudiará la producción de la plantación y su relación con diversas variables.

Niveles de fertilización

Como ya se ha comentado anteriormente, en la zona de estudio se han llevado a cabo diferentes métodos de fertilización con nitrato amónico en el primer año, y NPK 6:20:10 en el segundo, a diferentes niveles. Analizando los datos de producción según la fertilización utilizada, se concluye claramente que la misma ha influido fuertemente en la producción del dispositivo, independientemente del clon:

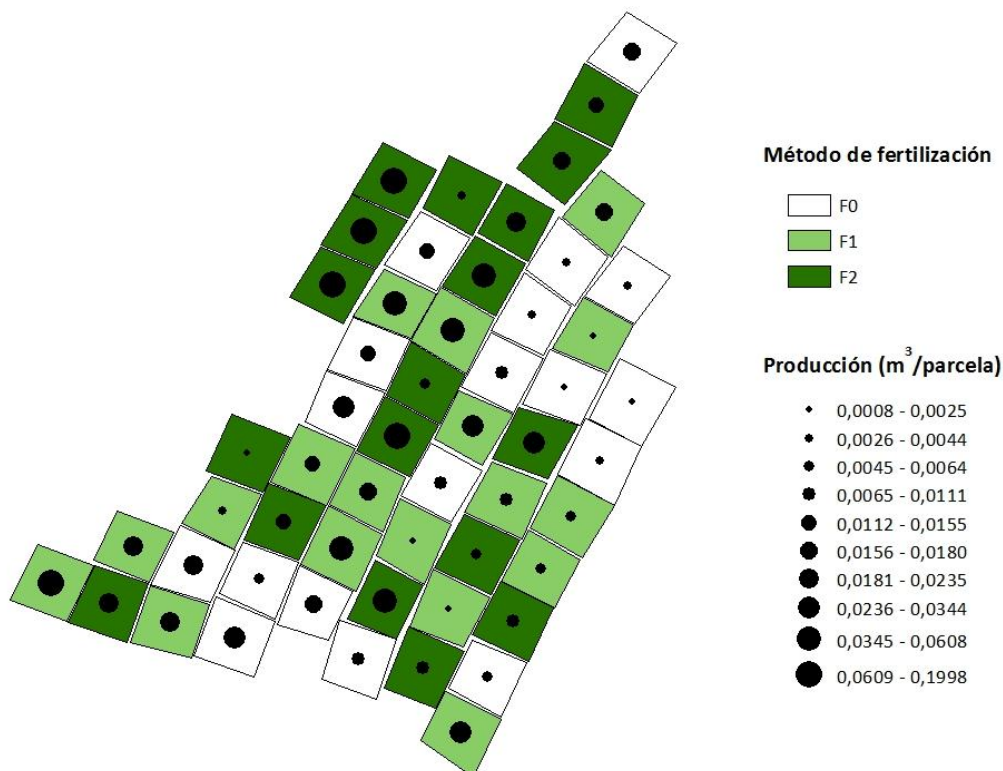


Figura 6. Representación de la producción (m³/parcela) en Cantil I según los niveles de fertilización aplicados.

Como se puede ver en la imagen superior (figura 6), las parcelas en las que no se realizó ningún tipo de fertilización adicional se corresponden con los valores más bajos de producción en volumen, mientras que también se puede ver que en las parcelas con fertilización adicional (F1 y F2) hay una clara diferencia, obteniéndose mayor producción en aquellas con una fertilización más agresiva.

Si se analiza esta misma relación utilizando un gráfico, como por ejemplo un diagrama de caja, se puede observar claramente dicha tendencia:

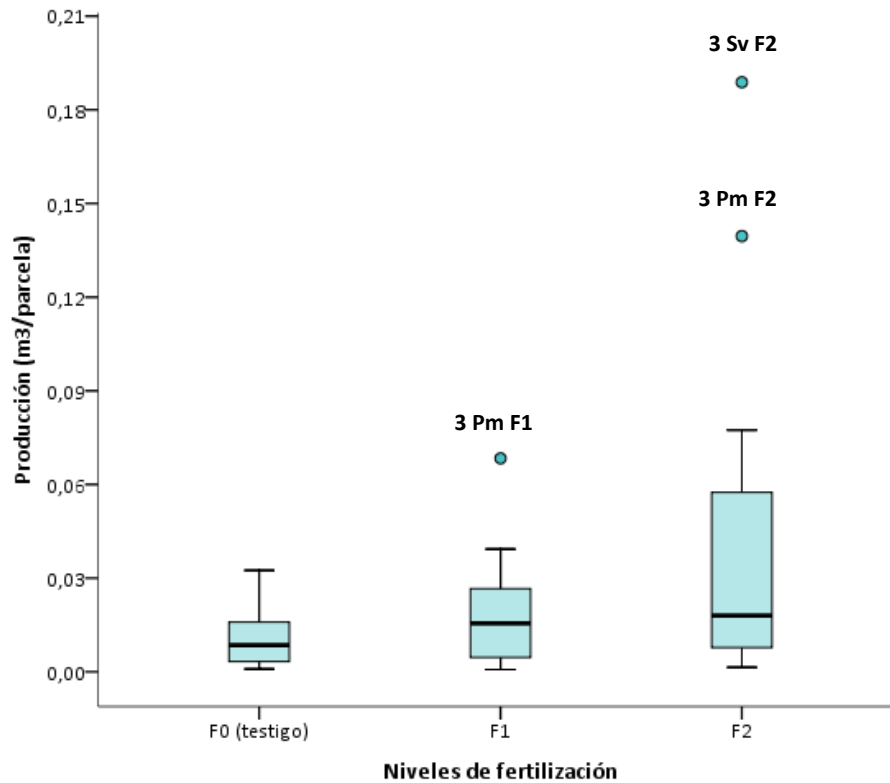


Figura 7. Diagrama de cajas de la producción (m^3 /parcela) en Cantil I según los niveles de fertilización aplicados.

Esta relación también se puede comprobar con las correlaciones bivariadas de Spearman:

Tabla 3. Correlaciones de Spearman entre la fertilización y las variables dasométricas.

		Fertilización	Altura	D25
Producción en volumen	Coefficiente de correlación	0,298 *	0,774 **	0,867 **
	Sig. (bilateral)	0,028	0,000	,000
	N	54	54	54

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

El volumen está directamente relacionado con el método de fertilización, con una correlación de 0,298, significativa a un nivel bilateral del 5%, y con una media de 0,0235 m^3 /parcela según sus estadísticos descriptivos:

Tabla 4. Estadísticos descriptivos del volumen (m^3 /parcela) en Cantil I.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Dev. típ.
Volumen (m^3 /parcela)	54	0,0007	0,1888	0,0235	0,0337

Sin embargo, como ya se ha especificado anteriormente, la variable que en este caso cobra mayor importancia al tratarse de una plantación energética es la producción en peso y no en volumen. Por este motivo, se van a estudiar los datos de biomasa obtenida en campo (en kilogramos) y comprobar qué nivel es el que ha proporcionado mejores resultados, ya que no tiene por qué coincidir necesariamente con la producción en volumen.

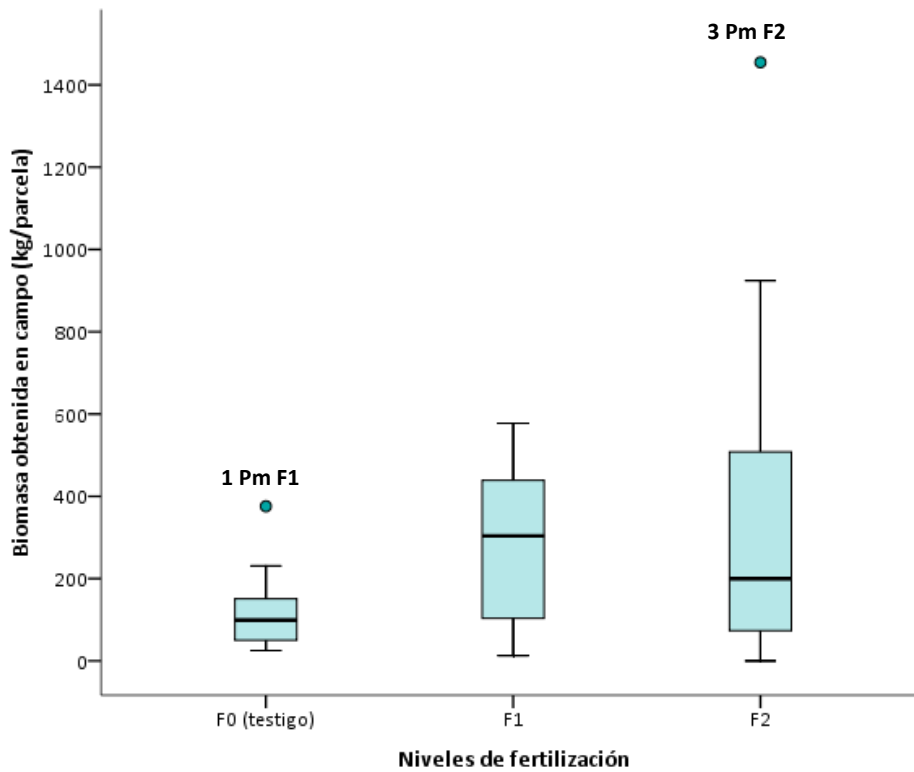


Figura 8. Diagrama de cajas de la producción (kg/parcela) en Cantil I según los niveles de fertilización aplicados.

En el diagrama de cajas se puede comprobar que el nivel de fertilización con el que se han obtenido mejores resultados de producción en peso ha sido también el nivel F2 (600kg/ha de NPK). Sin embargo, sí que se observan resultados algo distintos a los de los resultados en volumen; por ejemplo, la parcela 3SvF2, que mostraba un valor muy elevado de m^3 , ya no destaca como una de las parcelas con mayor volumen en peso, quedándose con una media de 725 kg, frente a los 1454 kg correspondientes a la parcela 3PmF2. Esto puede ser debido a que el clon *Monviso* tenga más desarrollada su parte aérea, y por tanto, a un mismo volumen de fuste, tenga un mayor peso de biomasa en campo.

La media de biomasa obtenida en campo es, según los estadísticos descriptivos, de 248,3 kg/parcela, pero con una elevada variabilidad:

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la biomasa obtenida en campo (kg/parcela)

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Biomasa obtenida en campo (kg/parcela)	54	0,000	1454,730	248,360	2,71 * E2

La relación, en este caso de la biomasa obtenida y la fertilización aplicada, también se comprueba con las correlaciones bivariadas de *Spearman*, que muestran una correlación algo menor que en el caso del volumen, pero también significativa a un nivel de 0,05 (bilateral):

Tabla 6. Correlaciones de Spearman entre la biomasa obtenida en campo (kg), el volumen (m³) y el nivel de fertilización aplicado.

		Nivel de fertilización	Volumen (m ³)
Biomasa obtenida en campo (kg)	Coefficiente de correlación	0,287*	0,681**
	Sig. (bilateral)	0,379	0,000
	N	54	54

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Estos resultados coinciden con los esperados, ya que esto significa que los niveles de fertilización aplicados son adecuados para las variedades de especies forestales utilizadas en el ensayo, y que la aplicación de NPK ha tenido un efecto positivo sobre el desarrollo de la biomasa de la planta.

Producción de los clones utilizados

Una vez estudiada la producción del cultivo según los distintos niveles de fertilización que se han llevado a cabo en la misma, se procede a analizar también la producción según los clones utilizados, con el fin de determinar cuál de ellos se está adaptando mejor a las condiciones del terreno y permite obtener un mayor rendimiento energético, que es el objetivo final que se persigue en el cultivo.

En este caso y a partir de ahora, la variable que se discutirá será la biomasa en peso obtenida en campo, ya que es aquella que más interesa.

Para ello, se analiza primero la producción en biomasa por clones de un modo visual:

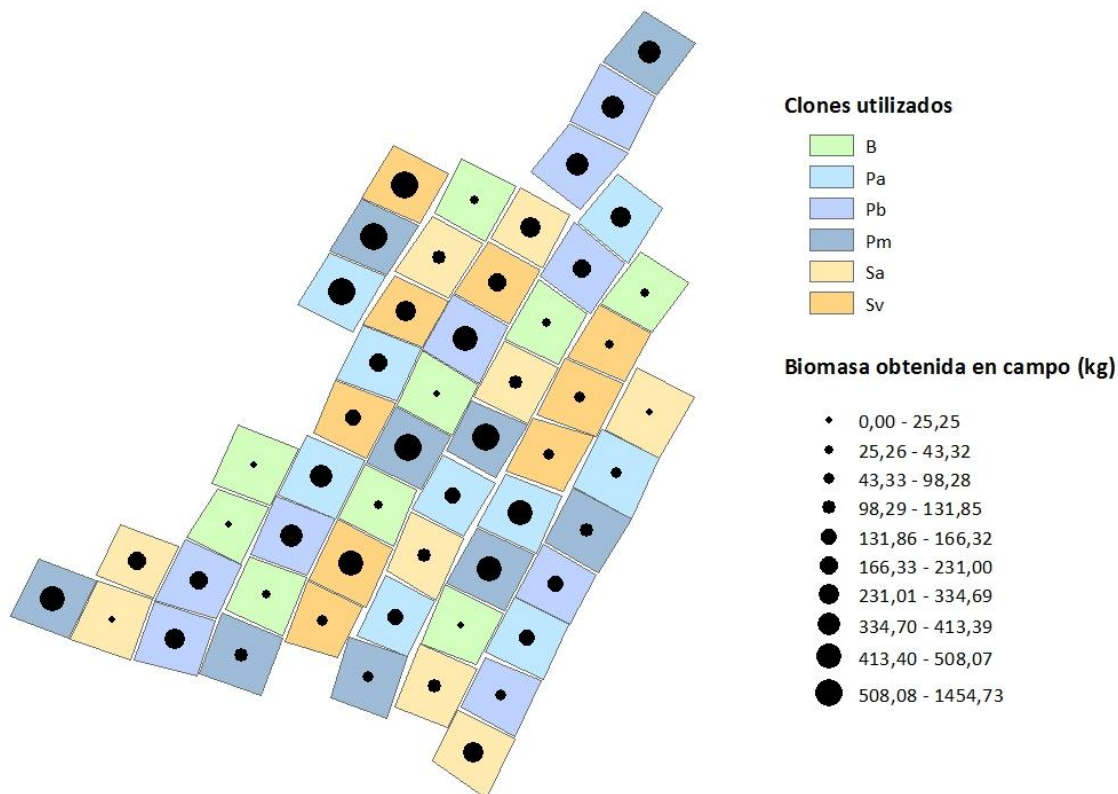


Figura 9. Representación de la biomasa obtenida en campo (kg/parcela) según los clones instalados.

De la imagen se puede deducir a simple vista que el clon de *Betula celtiberica* es el que ha proporcionado una menor producción, mientras que los clones de chopo y sauce (en tonos azules y naranjas, respectivamente) han respondido mejor a las características del terreno y a los métodos de fertilización utilizados. Para analizar con más detalle esta relación, se recurre a un gráfico de barras apiladas, para ver también la distribución de las fracciones fina, intermedia y gruesa de biomasa:

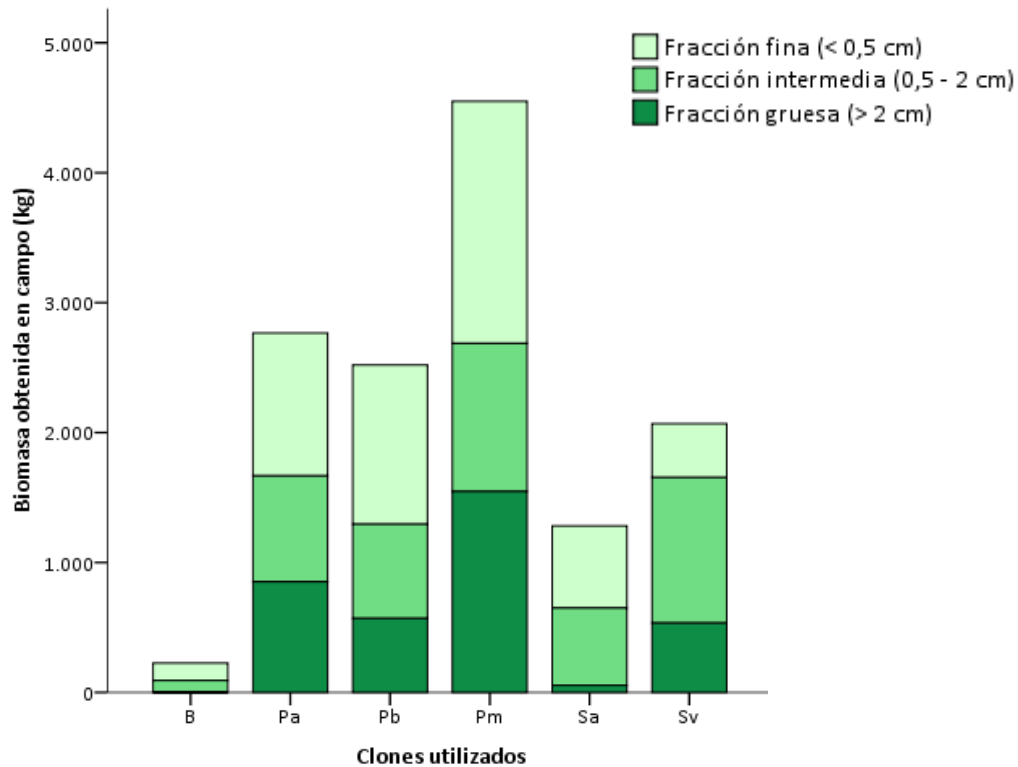


Figura 10. Diagrama de barras representando la producción de biomasa (kg) de cada uno de los clones y por fracciones.

Los clones que han mostrado diferencias significativas han sido los clones de chopo AF2 (Pa) y Monviso (Pm), especialmente este último, tal y como muestra la siguiente tabla:

Tabla 7. Biomasa media obtenida en campo en kg/parcela y kg/ha de cada uno de los clones.

	Betula celtiberica	AF2	Beaupré	Monviso	Salix alba	Tora
Biomasa media en campo (kg/par)	25,16	307,27	279,97	505,49	142,50	229,80
Biomasa media en campo (kg/ha)	628,98	7681,74	6999,25	12637,17	3562,55	5744,89

Estas diferencias se deben a que, por sus características, los chopos tienen una serie de ventajas ambientales, económicas y sociales como productores de materia prima para generar energía, como su vigoroso crecimiento juvenil, gracias al cual se pueden alcanzar crecimientos de 100m³ en cuatro años, mientras que otras especies en una explotación forestal tradicional, requieren de 25 a 40 años para lograr producciones comparables (Kauter et al., 2003).

La capacidad de hibridación y la facilidad para la multiplicación vegetativa de los chopos ha contribuido a que se desarrolle una oferta clonal muy extensa, con genotipos que reúnen características deseables para diferentes usos, lo que sin duda favorece su expansión y facilidad de cultivo (Sixto et al., 2007).

Entre la gran oferta vegetativa, diversos ensayos (Sixto et al., 2007) ya han puesto de manifiesto diferencias significativas en cuanto a la producción de biomasa de los clones AF2 y *Monviso*. Así, en 2009 se llevó a cabo un diseño experimental (Pérez-Cruzado, 2013) en la provincia de León con diferentes genotipos híbridos de *Populus* para evaluar su comportamiento en turnos de corta breves, obteniéndose los mejores resultados con los clones AF2, *Guardi*, USA 49-177 y *Monviso*, al final del turno (tercer periodo vegetativo).

Análisis del clon más productivo

Una vez demostrado que el clon más productivo en la plantación ha sido el clon Monviso, se analizará la influencia de las cualidades físico-químicas del suelo en su producción, así como la orografía del terreno.

Para ello, se realizarán análisis estadísticos que determinen qué factores tienen una mayor correlación con las variables dasométricas y por tanto, influyen más fuertemente en su producción y en la obtención de biomasa para fines energéticos.

Características químicas del suelo.

Según las correlaciones bivariadas de Spearman, la biomasa obtenida en campo sólo tiene correlación directa con la relación C/N en suelo y de forma negativa:

Tabla 8. Correlaciones de Spearman entre la producción de biomasa (kg) del clon Monviso y las características químicas del suelo.

		pH	CE	P	N	MO	C	CN	Ca	K	Mg	Na	CCC	Al	CICE
Biomasa obtenida en campo (kg)	Coefficiente de correlación	-0,40	-0,13	0,52	,61	-0,24	0,04	-0,73*	-0,23	0,30	0,07	0,08	0,27	0,23	0,22
	Sig. (bilateral)	0,29	0,73	0,14	0,08	0,53	0,92	0,02	0,55	0,43	0,86	0,83	0,49	0,56	0,58
	N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

**.. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Esta correlación negativa significa que la biomasa obtenida con la plantación del clon Monviso va aumentando a medida que disminuye la relación C/N. A continuación se va a proceder a explicar dicha correlación:

La relación C/N de un suelo es un indicador de la cantidad de materia orgánica del mismo y de la forma en que ésta se incorpora al suelo, ya sea mediante una mineralización primaria (valores C/N más bajos) o mediante la humidificación (valores C/N elevados) e indica, por tanto, la riqueza del mismo (Fuentes, 1999).

Para el crecimiento de las plantas, se estima que en general la relación óptima es aquella en que mineralización y humidificación se equilibran y se encuentra aproximadamente entre 8,5 - 10%. Sin embargo, esta es una estimación relativa y que depende de la especie implantada en el sustrato, ya que determinadas especies necesitan grandes cantidades de nitrógeno disponible en el suelo para su correcto crecimiento y especialmente para el desarrollo de la parte aérea, que es justamente el objetivo de esta plantación.

Además, es importante tener en cuenta que el ión nitrato (proveniente de la mineralización) se mueve libremente en el suelo debido a su carga negativa, lo que le permite difundirse a través del suelo hacia las raíces de la planta (Plaster, 1997).

En las 9 parcelas en las que está instalado el clon objeto de estudio de este apartado (*Monviso*), el porcentaje C/N se encuentra entre 7,4 y 13%, coincidiendo los valores más elevados con las parcelas sin fertilización adicional (F0) y los más bajos con las parcelas correspondientes a la fertilización de 600 kg/ha de NPK (F2), tal como se recoge en la tabla 9:

Tabla 9. Proporción C/N (%) en las parcelas dónde está instalado el clon *Monviso*.

Parcela	C/N (%)
3PmF2	7,433
1PmF2	8,423
1PmF1	9,689
2PmF1	9,789
2PmF2	10,358
3PmF1	10,838
1PmF0	12,147
3PmF0	12,6
2PmF0	13,095

A continuación, estudia la información de un modo visual, mediante software *GIS*, donde se aprecia perfectamente esta relación:

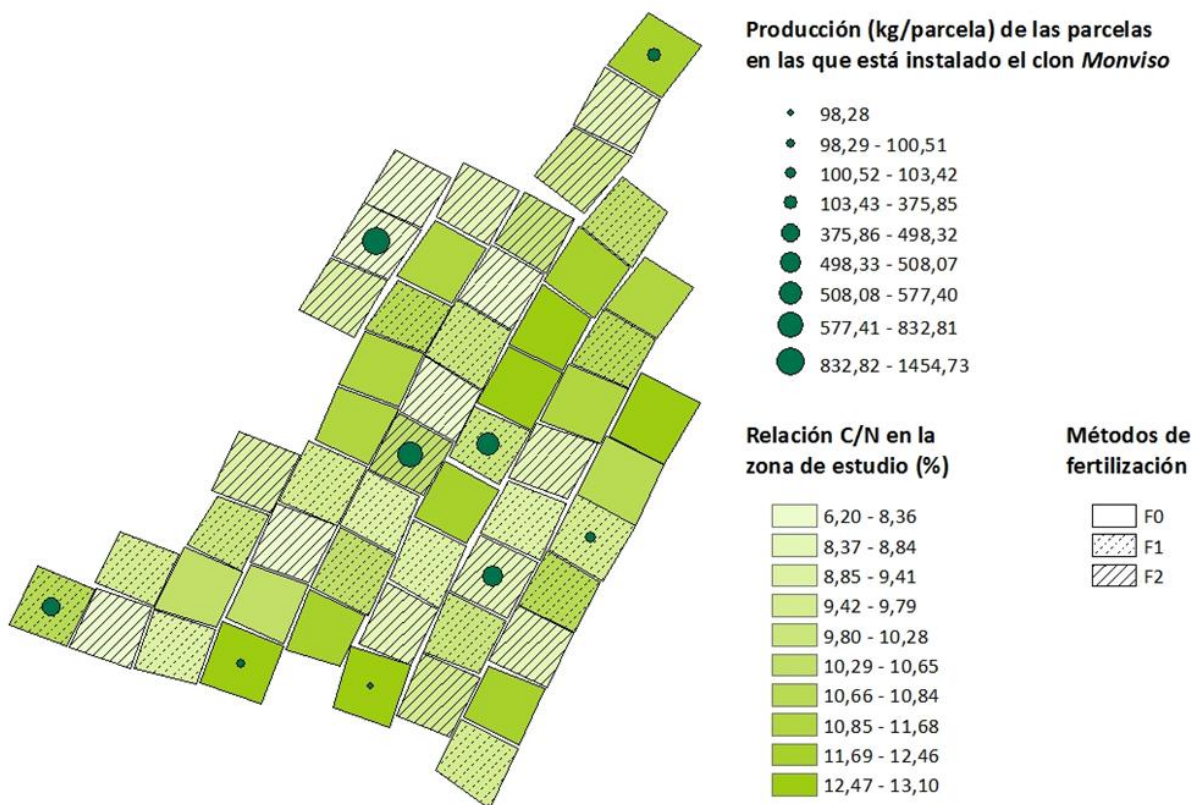


Figura 11. Relación entre la producción (kg/parcela) del clon *Monviso* y el porcentaje C/N del suelo.

Características físicas del suelo.

Una vez estudiada la relación entre producción y las cualidades químicas del sustrato, se va a proceder a estudiar las cualidades físicas, es decir, textura y profundidad del mismo.

Haciendo uso de las correlaciones bivariadas de Spearman, se concluye que la cantidad de biomasa producida por el *Monviso* está correlacionada significativamente con el contenido en arena y arcilla del suelo.

Tabla 10. Correlaciones de Spearman entre la producción de biomasa (kg) del clon *Monviso* y las características físicas del suelo.

		Arena	Limo	Arcilla	Profundidad efectiva
Biomasa obtenida en campo (kg)	Coeficiente de correlación	0,800**	-0,217	-0,800**	0,000
	Sig. (bilateral)	0,010	0,576	0,010	1,000
	N	9	9	9	9

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Estos resultados se deben a que la mayoría de las parcelas presentan una textura franco-arenosa o franco-arcillo-arenosa, por lo que la proporción de limo correspondiente es baja en comparación con las otras dos fracciones y por ese motivo no influye de modo significativo en el crecimiento de las plantas instaladas.

En este caso, las correlaciones de *Spearman* obtenidas concluyen que la biomasa obtenida en campo se correlaciona con la arena de un modo positivo y con la arcilla de modo negativo. La explicación a este comportamiento se basa en la textura y estructura del suelo, así como en su profundidad:

Las partículas de arcilla son aquellas con un tamaño menor de 0,002 mm, y proporcionan poros más pequeños y numerosos, en los que la retención de agua es mayor, sin embargo, exigen cuidados para mantener una aireación adecuada y que las raíces de las plantas no se asfixien (Fuentes, 1999). Además su fertilidad varía mucho dependiendo del tipo de arcilla que se encuentre en el suelo, según sea caolinita, micácea, esmectita, vermiculita o clorita, ya que cada una tiene unas cualidades diferentes, que hacen que el sustrato sea más o menos apto para las plantas.

Por otro lado, lo contrario ocurre con la fracción de arena, que proporciona unos poros mayores en los que el agua puede lixiviar hacia las capas más profundas, quedando fuera del alcance de las raíces.

En este caso, la profundidad efectiva del suelo es baja, sólo con una media de 31,21 cm. en la parcelas del clon *Monviso*. Esta característica, a pesar de que puede tener aspectos negativos, en este caso ayuda a que el agua que se pudiera lixiviar debido a alto contenido de arena en el suelo (57,7% de media) no baje hasta capas muy profundas. Pero por otro lado intensifica la característica negativa de la arcilla en cuanto a la mala aireación de las raíces.

A continuación, se muestra visualmente (figura 12) la correlación entre el nivel de arena de las parcelas y la producción del clon *Monviso* (expresada en kg/parcela), donde se puede apreciar perfectamente cómo la parcela con mayor producción es también la que tiene un elevado contenido de arena en el sustrato. Es decir, que existe una clara correlación positiva:

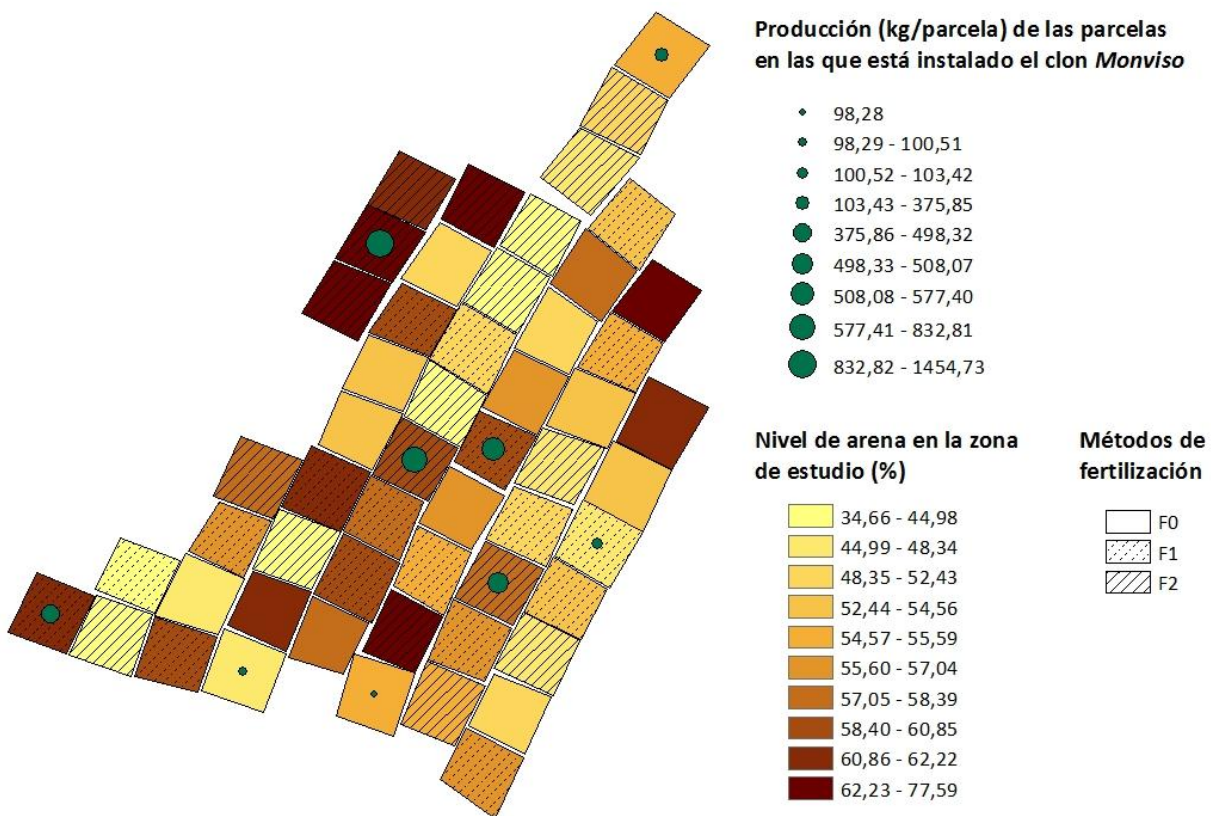


Figura 12. Representación de la producción en biomasa (kg/parcela) del clon *Monviso* según la proporción de arena en el suelo.

Y lo mismo se hace con el contenido en arcilla del suelo (figura 13): se visualiza en software GIS, y se aprecia sin problemas la correlación negativa que existe entre ésta y la producción de biomasa de *Monviso*.

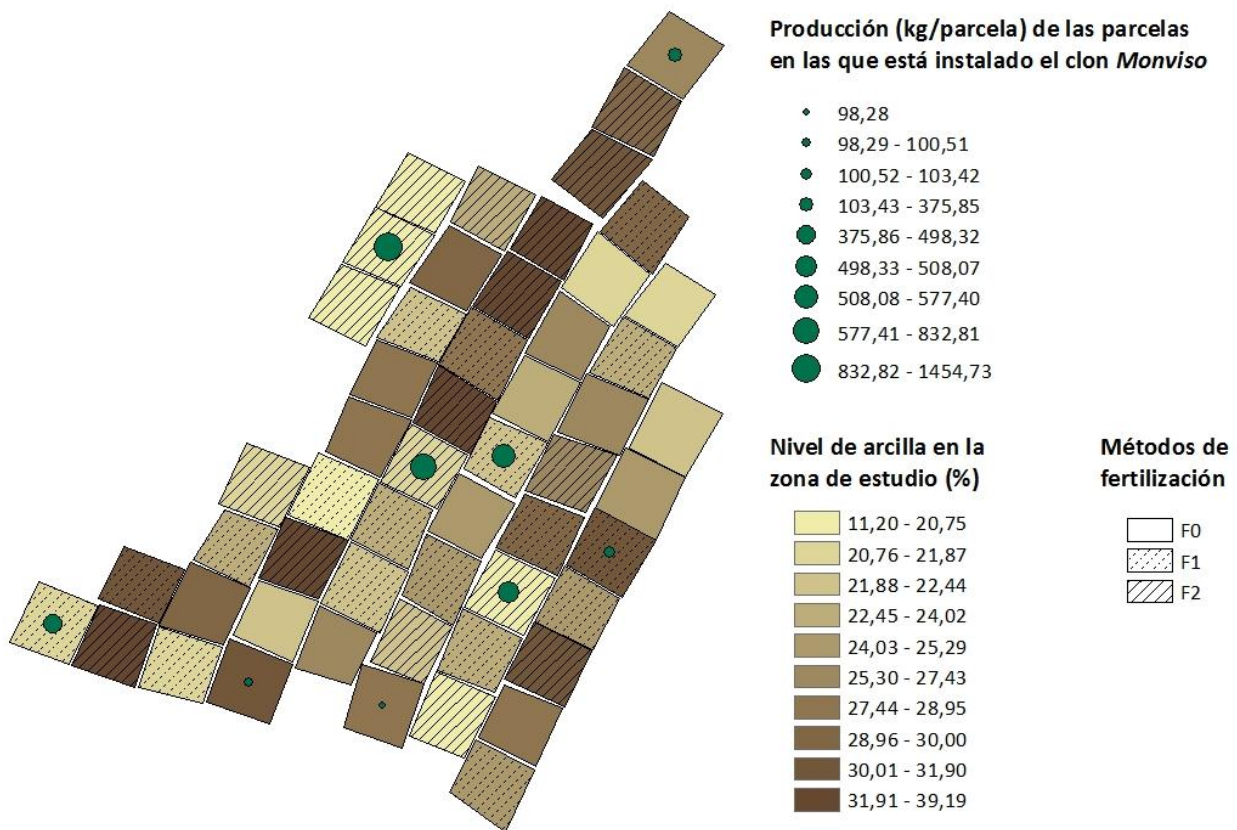


Figura 13. Representación de la producción en biomasa (kg/parcela) del clon *Monviso* según la proporción de arcilla en el suelo.

Orografía de la zona.

En este apartado se va a comprobar si existe alguna relación entre la biomasa obtenida y las características orográficas de la zona de estudio (pendiente y orientación).

Para ello, con un modelo digital de elevaciones -MDE-, se generan en ArcGIS las capas de pendientes y orientaciones de la zona, y después se extraen los valores en los puntos centrales de las parcelas.

De eso modo, y utilizando las correlaciones bivariadas de Spearman, sólo se obtiene correlación significativa con la pendiente:

Tabla 11. Correlaciones de Spearman entre la producción de biomasa (kg) del clon *Monviso* y la pendiente de las parcelas.

		Pendiente de las parcelas (%)
Biomasa obtenida en campo (kg)	Correlación de Pearson	-0,750*
	Sig. (bilateral)	0,020
	N	9

*. La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Contrariamente a lo que se podría pensar debido a que la zona de estudio no es muy grande, la pendiente cobra especial importancia en el establecimiento de los árboles debido a su variabilidad (tabla 12), y como es lógico, la correlación es negativa, ya que cuanto mayor sea la pendiente de la zona, más probabilidades hay de que los nutrientes y el agua se muevan en la misma.

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de la pendiente.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Pendiente (%)	9	4,6385	27,1911	19,4621	7,2159

Correlaciones entre producción y fertilización.

Una vez estudiados los factores físico-químicos del suelo, se va a comprobar si los niveles de fertilización están correlacionados con la producción del clon Monviso:

Tabla 13. Correlaciones de Spearman entre la biomasa obtenida en campo (kg) del clon Monviso y los niveles de fertilización aplicados.

		Niveles de fertilización
Biomasa obtenida en campo (kg)	Coefficiente de correlación	0,843**
	Sig. (bilateral)	0,004
	N	9

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Según las correlaciones de Spearman, los niveles de fertilización se correlacionan de forma positiva y además muy significativa con la producción de biomasa en campo del chopo Monviso. Además, si se observa esta relación por fracciones fina, intermedia y gruesa de biomasa, también se cumple una correlación significativa con la fertilización en los tres casos:

Tabla 14. Correlaciones de Spearman entre la biomasa obtenida en campo (kg) del clon Monviso y por fracciones (fina, intermedia y gruesa) y los niveles de fertilización aplicados.

		Fracción fina de biomasa (< 0,5 cm)	Fracción intermedia de biomasa (0,5 - 2 cm)	Fracción gruesa de biomasa (> 2 cm)
Niveles de fertilización	Coefficiente de correlación	0,791*	0,738*	0,767*
	Sig. (bilateral)	0,011	0,023	0,016
	N	9	9	9

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Estos resultados son los esperados, ya que significa que los niveles de fertilización son apropiados para el crecimiento y desarrollo del clon de chopo Monviso y además ha habido una mejor respuesta en aquellas parcelas con el nivel de fertilización F2 (600 kg/ha de NPK

6:20:12). Los estadísticos de la biomasa total obtenida en campo y divididos según niveles de fertilización son los siguientes:

Tabla 15. Estadísticos descriptivos de la biomasa obtenida en campo (kg/parcela) del clon Monviso según los diferentes niveles de fertilización.

	F0 (testigo)					
	N	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Desv. típ.
Biomasa obtenida en campo en las 3 parcelas (kg)	3	98,28000	375,84540	574,63560	191,5452000	1,59612550E2
	F1 (300 kg/ha de NPK 6:20:12)					
	N	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Desv. típ.
Biomasa obtenida en campo en las 3 parcelas(kg)	3	103,42080	577,39500	1179,13320	393,0444000	2,53918666E2
	F2 (600 kg/ha de NPK 6:20:12)					
	N	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Desv. típ.
Biomasa obtenida en campo en las 3 parcelas (kg)	3	508,06980	1454,73300	2795,61240	931,8708000	4,81043288E2

Como se puede ver, hay grandes diferencias entre la producción total en cada uno de los tres casos: la producción de Monviso en las tres parcelas con el mayor nivel de fertilización ha superado en aproximadamente un 137% a la producción en aquellas con una fertilización aplicada menor, y en un 386% a la de las parcelas “testigo” (sin fertilización adicional). Además en el siguiente gráfico de dispersión se observa que con una curva de tendencia polinómica de orden 2, el R^2 es igual a la unidad.

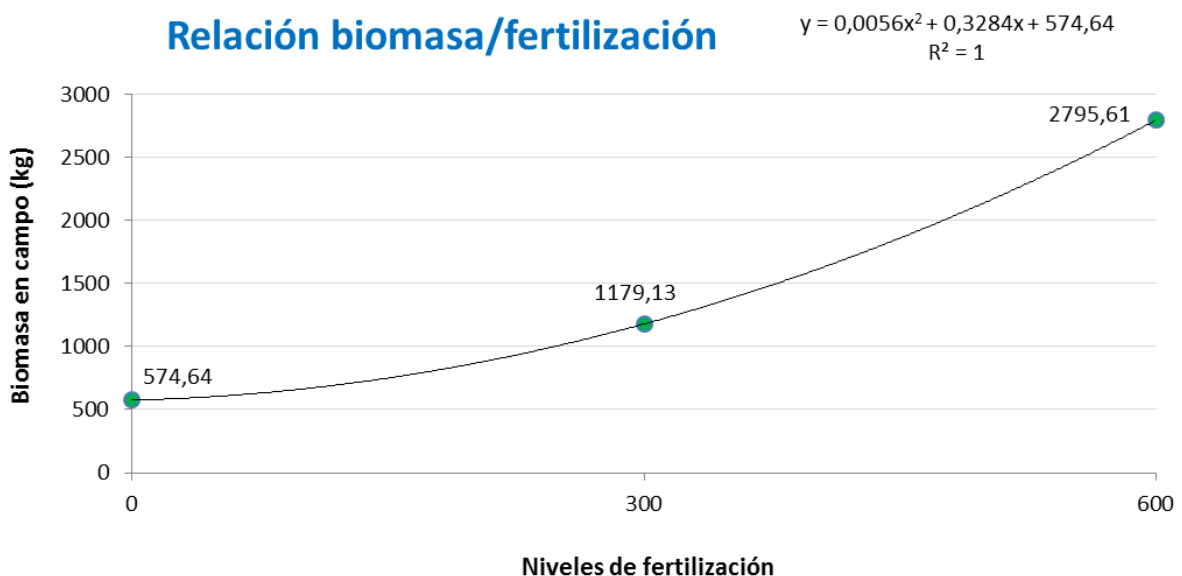


Figura 14. Gráfico de dispersión entre la biomasa obtenida en campo (kg) del clon Monviso y los distintos niveles de fertilización.

A continuación, se muestra esta relación en una imagen obtenida mediante software GIS, donde se puede ver cada una de las fracciones por separado y también se adjunta una tabla con los resultados exactos en kilogramos de cada una de las parcelas de *Monviso*, donde se comprueba que éstos van aumentando significativamente con el aumento de la fertilización:

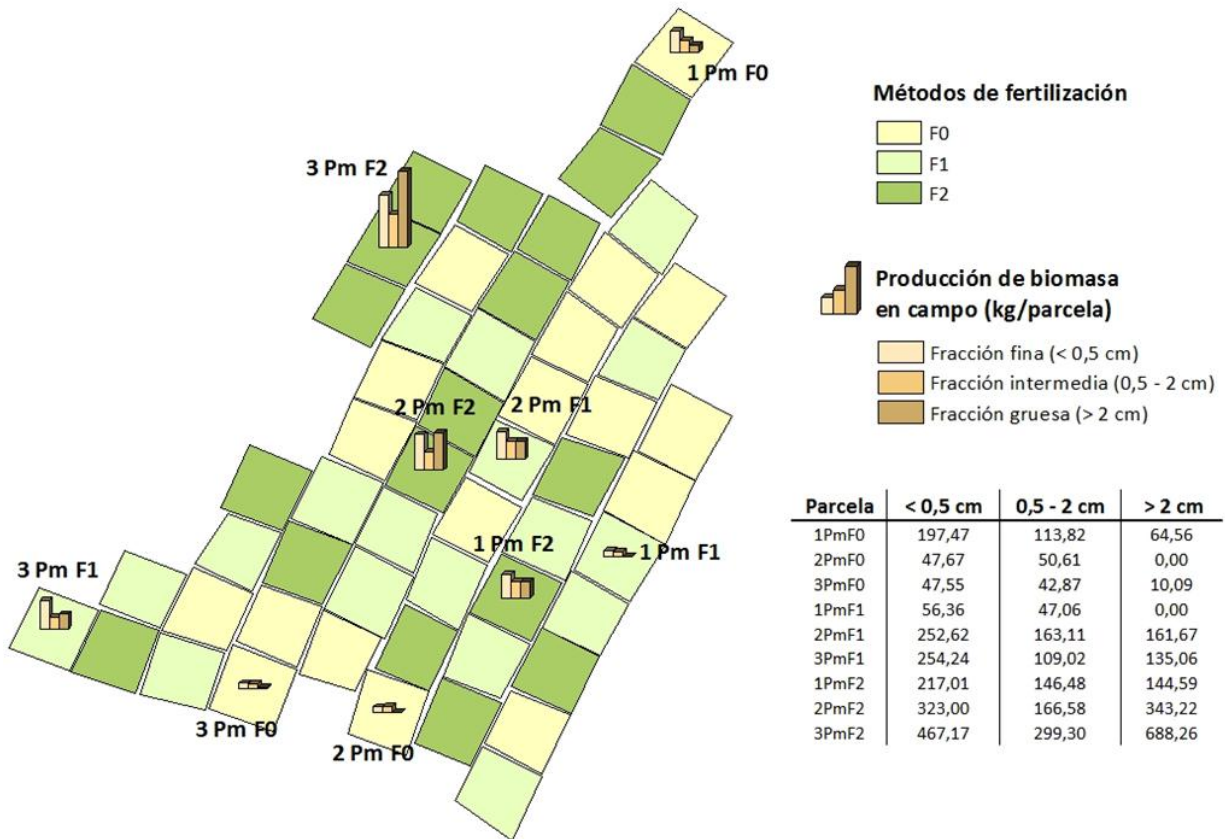


Figura 15. Representación de la producción de biomasa (kg/parcela) del clon *Monviso* distribuida en fracciones (fina, intermedia y gruesa) según los niveles de fertilización aplicados.

Poder calorífico de la plantación

Para estimar el poder calorífico de la plantación, primero es necesario saber el contenido de humedad de la madera, cuyos resultados por clon son los siguientes:

Tabla 16. Humedad media de la madera según clones.

	<i>Betula celtiberica</i>	AF2	Beaupré	Monviso	Salix alba	Tora
Humedad media en base húmeda (%)	51,92	57,08	53,35	58,94	52,75	47,37

Una vez obtenida la humedad, ya se puede calcular el poder calorífico neto de la biomasa a ese nivel específico de humedad con la siguiente fórmula (FAO, 2004):

$$H_{u(w)} = [H_{u(wf)} \cdot (100 - w) - 2,44 \cdot w] / 100$$

donde w = es la humedad total de la madera en porcentaje.

$H_{u(wf)}$ = poder calorífico neto de la biomasa totalmente seca. [6]

Los resultados medios obtenidos se muestran en la tabla 17:

Tabla 17. Poder calorífico medio (MJ/Kg) según clones al nivel de humedad actual.

	<i>Betula pubescens</i>	AF2	Beaupré	Monviso	Salix alba	Tora
Poder calorífico al nivel de humedad actual (MJ/Kg)	11,34	6,99	8,09	7,51	9,33	10,09

Y por último, se multiplican los valores del poder calorífico en MJ/Kg obtenidos por los kilogramos de biomasa obtenida en campo para cada uno de los clones (tabla 18).

Tabla 18. Poder calorífico (MJ) según los diferentes clones y poder calorífico total de la plantación.

	<i>Betula pubescens</i>	AF2	Beaupré	Monviso	Salix alba	Tora
Poder calorífico medio (MJ/Kg)	11,34	6,99	8,09	7,51	9,33	10,09
Biomasa total en campo (Kg)	226,43	2765,43	2519,73	4549,38	1282,52	2068,16
Poder calorífico en la plantación (MJ)	2535,15	17155,99	19162,23	29976,08	10477,34	18937,87

PODER CALORÍFICO TOTAL

[6] Poderes caloríficos netos: chopo en rotación corta = 18,5 MJ/Kg (FAO, 2004); sauce en rotación corta = 18,4 MJ/Kg; (FAO, 2004) abedul = 19,26 MJ/Kg (IDAE, 2007).

Finalmente, el poder calorífico total obtenido en la plantación es de **98244,66 MJ** en total, con la distribución que aparece en la siguiente figura:

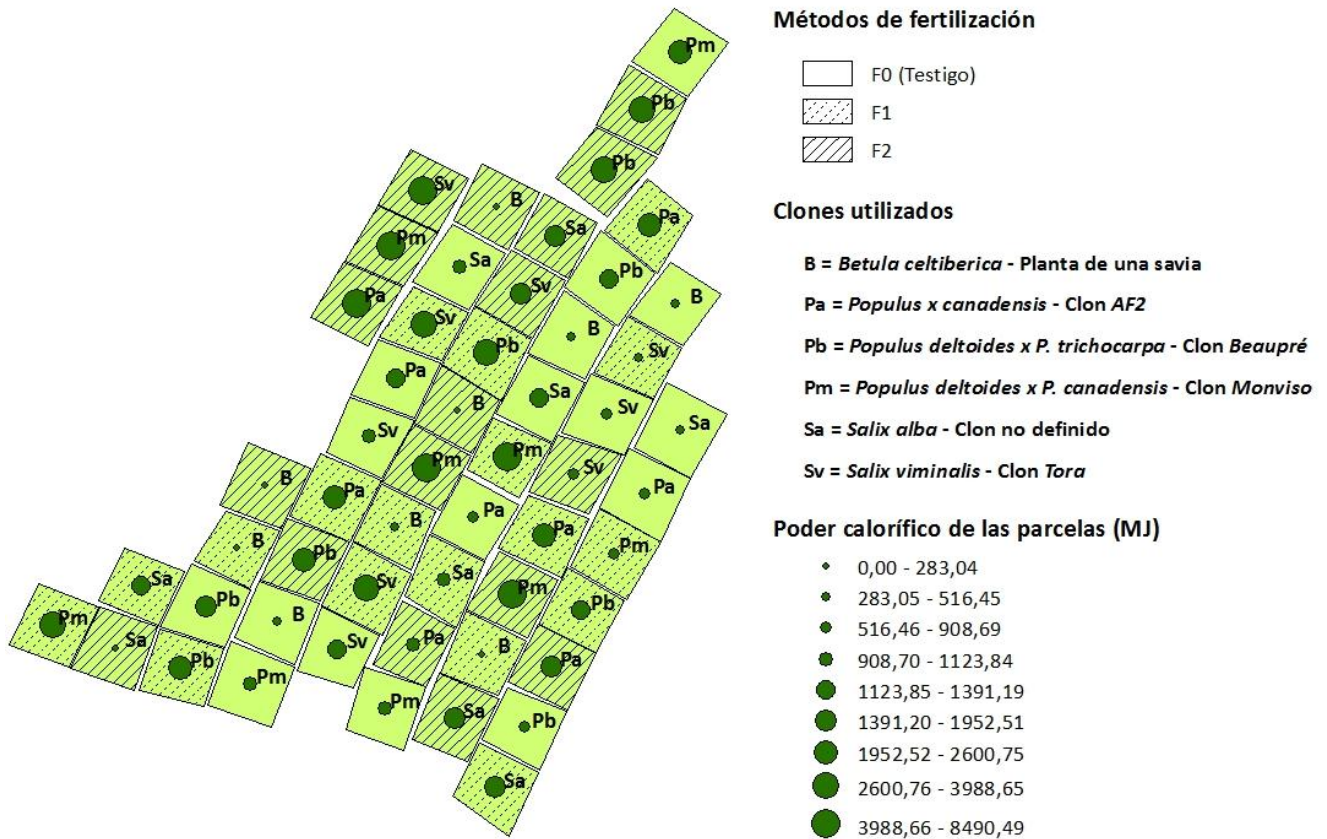


Figura 16. Poder calorífico de la plantación (MJ) distribuido en las parcelas.

Estimación del poder calorífico del clon *Monviso* en toda la plantación mediante un análisis de regresión múltiple

El análisis de regresión múltiple se realiza para el clon de chopo *Monviso*, ya que se ha comprobado que es el que más biomasa ha producido y más energía proporciona.

Método “Introducir”:

Con este método se introducen las variables que se desea incluir en la ecuación y por tanto sólo se obtiene un modelo. En este caso, dichas variables serán: *fertilización, relación C/N, proporción de arena, proporción de arcilla y pendiente*, que eran aquellas con las que se obtenían unas correlaciones significativas en cuanto a la producción.

De este modo, el resumen del modelo se muestra en la tabla 19:

Tabla 19. Resumen del primer modelo de regresión.

Resumen del modelo ^{b,c}									
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	0,968 ^a	0,936	0,830	1,79703758E2	0,936	8,824	5	3	0,051

a. Variables predictoras: (Constante), Pte, Arena, Fertilización, C/N, Arcilla

b. CLON = Pm (*Monviso*)

c. Variable dependiente: Biomasa obtenida en campo (kg)

El ajuste del modelo es bastante bueno, con un R = 0,968, y el modelo explica una proporción del 93,6% del total de la muestra; sin embargo, el error típico de la estimación es de 179,7 puntos, lo que puede suponer un error extremadamente grande en toda la plantación.

El SPSS también da la tabla de coeficientes, donde se proporcionan los detalles del modelo y de cada una de sus variables:

Tabla 20. Coeficientes del primer modelo de regresión.

Coeficientes ^{a,b}					
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	-993,710	2860,257		-0,347	0,751
Fertilización	0,642	0,631	0,382	1,018	0,384
C/N	145,043	154,365	0,632	0,940	0,417
Arena	18,073	31,385	0,374	0,576	0,605
Arcilla	-26,827	52,019	-0,400	-0,516	0,642
Pte	-31,773	29,405	-0,526	-1,081	0,359

- a. CLON = Pm (Monviso)
b. Variable dependiente: Biomasa obtenida en campo (kg)

Si se observan las pruebas t y sus p -valores o niveles críticos (“Sig”), se deduce que no existe suficiente evidencia muestral, puesto que el nivel de significancia es demasiado elevado, para afirmar que estas variables influyen de forma significativa en la estimación de la biomasa y con este modelo en concreto.

En la tabla 21 Se muestra el diagnóstico de colinealidad. El problema de la colinealidad en los modelos de regresión es el siguiente: cuando dos variables están muy correlacionadas, hasta el punto incluso de ser colineales, es decir, que exista una relación aproximadamente lineal entre ellas, proporcionan un importante error al modelo, ya que hace que los estimadores que se obtengan sean poco precisos.

En dicha tabla aparecen los índices de condición, y la participación de cada variable en las varianzas asociadas a las distintas raíces características (autovalores). Como las raíces están ordenadas de mayor a menor, el índice de condición de la última fila es el número de condición, y por tanto el de mayor interés. El número de condición en este caso es de 138,3, índice que según Belsley (1980; citado en Estarrelles y Prieto, 1996) se corresponde con una colinealidad muy fuerte.

Tabla 21. Diagnóstico de colinealidad del primer modelo de regresión.

		Diagnósticos de colinealidad ^{a,b}							
Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza					
				(Constante)	Fertilización	C/N	Arena	Arcilla	Pte
1	1	5,396	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,540	3,162	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,036	12,208	0,00	0,25	0,00	0,01	0,01	0,06
	4	0,027	14,142	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,15
	5	0,001	70,748	0,05	0,48	0,92	0,04	0,03	0,64
	6	0,000	138,301	0,95	0,19	0,08	0,94	0,92	0,15

- a. CLON = Pm (Monviso)
b. Variable dependiente: Biomasa obtenida en campo (kg)

Todos estos índices, las pruebas de significación y el análisis de colinealidad sirven para concluir que este primer modelo de regresión realizado mediante el método “Introducir” no ha proporcionado los resultados esperados, por lo que se va a proceder a buscar otro modelo mejor mediante el método de pasos sucesivos o “Stepwise”.

Método “Stepwise” o de pasos sucesivos:

Con este método de análisis, el programa va introduciendo las variables una por una según un criterio específico; en este caso, se deja el criterio por defecto, que es que una variable entra en la ecuación si su índice $F \leq 0,05$ y sale de la misma si $F \geq 0,1$. Con dicho criterio, se van realizando diferentes ecuaciones de regresión, intentando mejorar el ajuste en cada una de las iteraciones.

En este caso, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 22. Resumen de los modelos de regresión obtenidos mediante el método “stepwise”.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	0,934 ^a	0,872	0,853	1,67070812E2	0,872	47,517	1	7	0,000
2	0,970 ^b	0,941	0,922	1,21876587E2	0,070	7,154	1	6	0,037
3	0,999 ^c	0,999	0,998	18,98577875	0,057	242,249	1	5	0,000

- a. Variables predictoras: (Constante), Arcilla
- b. Variables predictoras: (Constante), Arcilla, Fósforo
- c. Variables predictoras: (Constante), Arcilla, Fósforo, Aluminio
- d. CLON = Pm (Monviso)
- e. Variable dependiente: Biomasa obtenida en campo (kg)

Tabla 23. Coeficientes de los modelos de regresión obtenidos mediante el método “stepwise”.

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	1995,872	223,265		8,939	0,000
Arcilla	-62,630	9,086	-0,934	-6,893	0,000
2 (Constante)	1466,026	256,454		5,717	0,001
Arcilla	-54,617	7,274	-0,814	-7,509	0,000
Fósforo	44,143	16,504	0,290	2,675	0,037
3 (Constante)	1009,632	49,556		20,373	0,000
Arcilla	-54,530	1,133	-0,813	-48,126	0,000
Fósforo	53,402	2,639	0,351	20,237	0,000
Aluminio	343,837	22,091	0,247	15,564	0,000

- a. CLON = Pm (Monviso)
- b. Variable dependiente: Biomasa obtenida en campo (kg)

Tabla 24. Diagnóstico de colinealidad de los modelos de regresión obtenidos mediante el método “stepwise”.

Diagnósticos de colinealidad ^{a,b}							
Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza			
				(Constante)	Arcilla	Fósforo	Aluminio
1	1	1,968	1,000	,02	,02		
	2	,032	7,891	,98	,98		
2	1	2,861	1,000	,00	,01	,01	
	2	,122	4,834	,00	,17	,43	
	3	,016	13,280	,99	,82	,56	
3	1	3,797	1,000	,00	,00	,01	,00
	2	,134	5,322	,00	,08	,44	,05
	3	,057	8,132	,00	,37	,00	,62
	4	,012	17,780	1,00	,54	,55	,33

a. CLON = Pm (Monviso)

b. Variable dependiente: Biomasa obtenida en campo (kg)

En este proceso, el primero de los modelos obtenidos tiene un ajuste peor que en el caso anterior, sin embargo, en cada uno de los nuevos modelos ese ajuste va mejorando, llegando a alcanzar un R^2 de 0,999, lo que significa que el modelo puede explicar una proporción del 99,9% del total de la muestra. Además, dicho modelo consigue disminuir el error típico de la estimación hasta sólo 18,98.

Y si se observa la tabla de coeficientes, los niveles de significación del último modelo concluyen que existe suficiente evidencia muestral para admitirlas como influyentes. Por otro lado, el diagnóstico de colinealidad muestra un número de condición que nada tiene que ver con el del primer modelo y que significa que este aspecto no supone un problema en el modelo (Bensley, 1991, citado en Friendly y Kwan, 2008).

Modelo de regresión elegido:

Tras estudiar los diversos modelos de regresión, se elige el de R^2 más cercano a 1 y el de menor p -valor, es decir, el tercer modelo obtenido con el método de pasos sucesivos. La ecuación de regresión es la siguiente:

$$Biomasa_{Monviso} = 1009,632 - 54,530 \cdot Arcilla + 53,402 \cdot P + 343,837 \cdot Al$$

Esta ecuación incluye como variables explicativas de la biomasa a la proporción de arcilla del suelo, al fósforo y al aluminio, lo que resulta muy coherente con todo lo estudiado anteriormente.

La explicación a porqué no se incluye en la ecuación el método de fertilización y sin embargo sí aparece el fósforo es muy simple: resultan ser variables con una alta colinealidad por lo que una de las dos debía ser excluída de la ecuación. En este punto hay que recordar que la fertilización aplicada en la plantación es NPK 6:20:12, es decir, que el elemento que se aplica en mayor proporción es precisamente el fósforo, y por lo tanto, que dicho elemento influya en la producción de la biomasa arbórea significa que también lo hace la fertilización. La tabla 25 demuestra que existe correlación significativa entre el nivel de fertilización aplicado y el fósforo presente en el suelo.

Tabla 25. Correlación de Spearman entre el nivel de fertilización utilizado y el fósforo en el suelo.

		Fósforo
Fertilización	Coeficiente de correlación	0,424**
	Sig. (bilateral)	0,001
	N	54

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Por otro lado, se debe explicar el papel del aluminio como variable predictora. Éste es un elemento que tiene mucho que ver con el contenido de arcilla en el suelo (muy correlacionada con la biomasa en este caso), ya que estas partículas tienen precisamente un alto contenido en aluminio, que dependiendo del tipo de arcilla y de su capacidad de intercambio de aniones, puede ser liberado y aprovechable por las plantas.

Una vez elegida la ecuación, se procede a aplicarla mediante el software GIS en aquellas parcelas en las que no está instalado el clon *Monviso*. Para ello, se crea un nuevo campo en la tabla de atributos del “*shapefile*” de las parcelas y después se aplica la fórmula en los registros correspondientes mediante la calculadora de campos, obteniendo el siguiente resultado:

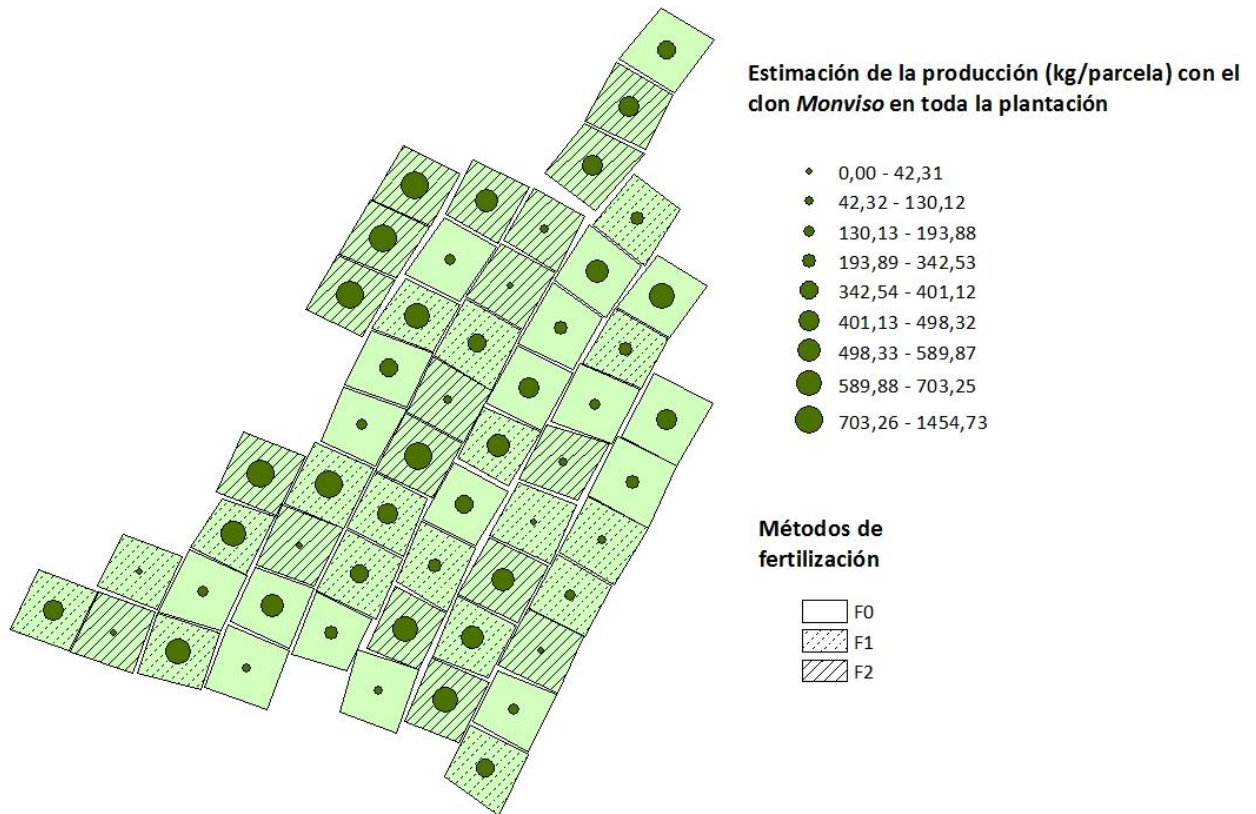


Figura 17. Representación de la estimación de la producción (kg/parcela) con el clon Monviso instalado en toda la plantación.

Por último, se realiza el mismo proceso para estimar el poder calorífico, que será el resultado de multiplicar la biomasa estimada por el poder calorífico en MJ/Kg del clon Monviso.

De este modo, el poder calorífico de la plantación aumentaría hasta los **163600 MJ**, en comparación con los 98244,66 MJ estimados en la plantación real, lo que supone un incremento de energía de más del 66% (el plano que ilustra esta estimación se encuentra en el Anexo I)

Conclusiones

El estudio del dispositivo experimental en “Cantil I” ha determinado que el tipo de fertilización aplicada en el mismo ha resultado ser adecuada y determinante para el desarrollo de los diferentes clones, especialmente el nivel de fertilización más agresiva, de 600 kg/ha de NPK 6:20:12, tal y como han demostrado las correlaciones bivariadas entre biomasa y fertilización, que han dado un valor de $\varphi = 0,298$, con un nivel de significación de 0,05.

Cabe destacar además, que el elemento del suelo que se correlaciona más positivamente con la biomasa obtenida del clon más productivo es el fósforo, justamente el elemento aplicado en mayor proporción en el sustrato, evidencia que ha quedado demostrada con el análisis de regresión lineal múltiple realizado.

En cuanto a los clones instalados en el dispositivo, han destacado con una mayor producción en biomasa los clones de chopo (9834,54 kg producidos), por lo que parece que han respondido mejor a la fertilización y al carácter del suelo de escombrera y que su característica de un crecimiento juvenil vigoroso ha resultado determinante en este aspecto. Este resultado corrobora además las conclusiones de otros ensayos relevantes de clones de chopo en nuestro país, como los ensayos realizados por Sixto en España entre 2007 y 2009, o los llevados a cabo por Labrecque y Teodorescu en Canadá (2001), que ya daban unos resultados espectaculares en cuanto a producción de biomasa de diversos clones de chopo.

Seguidos de los chopos en cuanto a productividad, se encuentran los sauces (3350,68 kg producidos) y por último el abedul, con una producción de sólo 226,43 kg en el dispositivo, lo que supone aproximadamente 629 kg/ha, por lo que a pesar de haber sido incluido en el ensayo por su capacidad para recuperar suelos de escombrera, no ha resultado ser útil como productor de biomasa en turnos de corta breves.

Centrando ya la atención en el clon *Monviso*, que ha sido el más productivo con grandes diferencias significativas (ha producido 12,6 t /ha de biomasa), las correlaciones de *Spearman* ha evidenciado que su desarrollo está negativamente correlacionado de forma lineal con la relación C/N del suelo, lo que quiere decir que este clon prefiere suelos con un contenido alto en nitrógeno y que además prefiere que la materia orgánica se mineralice para dar lugar al ión nitrato, que se puede mover libremente por el suelo y llegar hasta las raíces de la planta. Por otro lado, los valores más bajos de C/N en el suelo se corresponden con aquellas parcelas en las que se ha llevado a cabo la aplicación de NPK más agresiva, lo que permite

suponer que el nitrógeno ha sido retenido en el suelo y no ha pasado a los horizontes más profundos del mismo, dónde quedaría fuera del alcance de las raíces.

En cuanto a las características físicas del suelo requeridas por este clon, se ha demostrado que su producción (en kg) está correlacionada a un nivel de significación de 0,01 con la proporción de arena y de arcilla, de forma positiva con la primera y negativa con la segunda, sin embargo la fracción de limo no influye en ningún modo debido a que es la fracción menos significativa del suelo, cuya textura en la mayoría de la zona de estudio es franco-arenosa o franco-arcillo-arenosa. Lo que se puede deducir de estos resultados es que este clon prefiere suelos más arenosos, en los que la porosidad es mayor y las raíces no se asfixian; además en este caso, no hay problemas de lixiviación de agua debido a la baja profundidad efectiva del suelo (31,21 cm de media).

En la estimación del poder calorífico de la plantación, cabe destacar que éste no es tan alto como cabría esperar *a priori* debido a la elevada humedad de la madera, consecuencia probable del clima y la ubicación de la plantación. Aun así, se han obtenido resultados muy positivos, de 98244,66 MJ en el total de la plantación, lo que se traduciría en 32748 MJ/ha.

Por último, con un análisis de regresión lineal múltiple que examinara las variables explicativas en la producción del clon *Monviso*, se ha demostrado que el poder calorífico de la plantación se habría incrementado en más de un 66% si se hubiera instalado dicho clon en todo el dispositivo, llegando a alcanzar los 54533 MJ/ha, lo que no deja duda de la capacidad de este clon como productor de biomasa para su utilización como productor de energía.

Bibliografía

- CÁMARA OBREGÓN, A. 2008.** *Cultivos forestales energéticos: ¿una apuesta de futuro para el medio rural?*. Artículo publicado en Navarra Forestal, Nº 19 (Abril 2008). pp. 23-26.
- CEBALLOS, L.; RUIZ DE LA TORRE, J. 2001.** Árboles y arbustos de la España Peninsular. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Ed. Mundi-Prensa.
- CERDÁ, E. 2011.** *Energía obtenida a partir de biomasa*. Artículo realizado por la Universidad Complutense de Madrid. Cuadernos Económicos de ICE Nº 83, pp. 118-140.
- CERDÁ, E. 2012.** *La biomasa en España: una fuente de energía renovable con gran futuro*. Informe de la Fundación Ideas (Madrid). p. 7.
- CERRILLO, T. 2009.** *Panorama de los sauces en Argentina: avances en el mejoramiento genético y en la identificación*. Estación Experimental Agropecuaria del Delta de Paraná. II Jornadas de las Salicáceas, Mendoza.
- CONAMA (Congreso Nacional de Medio Ambiente), 2008.** *Los Montes y la crisis energética*. Documento presentado en la Cumbre del Desarrollo Sostenible. pp. 34-37.
- ESTARELLES, R.; PRIETO, J., 1996.** *Sensibilidad del análisis de la “estructura propia” en la detección de colinealidad* (Universidad de Valencia). Qüestiió, vol. 23, 3 pp. 549-562.
- FAO, 2004.** *Terminología unificada sobre bioenergía*. Departamento forestal de la FAO, pp. 26-30.
- FAO, 2008.** *Los álamos, los sauces y el bienestar de las poblaciones (Síntesis de los informes nacionales de progreso)*. Presentado en octubre de 2008 en 23ª reunión de la Comisión Internacional del Álamo (Beijing, China), p. 19.
- FRIENDLY, M.; KWAN, E., 2008.** *Where’s Waldo? Visualizing Collinearity diagnostics*. The American Statistician, vol. June 2008, pp. 56-65.
- FUENTES YAGÜE, J. L. 1999.** *El suelo y los fertilizantes*, Ed. Mundi-Prensa (5ª edición) pp. 21-29.

- HERNÁNDEZ INGELMO, M. 2006.** *Cultivos energéticos*. Ed.: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Valladolid (Servicio de Publicaciones). Colección Agricultura y Medio Ambiente. p.4.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), 2007.** *Energía de la biomasa*. 2º Manual de Energías Renovables. pp. 22-31.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), 2010.** *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011-2020*. pp. 11-12.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2008.** *Cambio climático 2007: Informe de Síntesis*. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra (Suiza).
- KAUTER, D.; LEWANDOWSKI, I.; CLAUPEIN, W. 2003.** Quantity and quality of harvestable biomass from Populus short rotation coppice for solid fuel use - a review of the physiological basis and management influences. *Biomass and Bioenergy* 24 (2003) pp.411-427.
- LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T.I., 2001.** *Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar nutrient status of two willow species grown under SRICin southern Quebec (Canada)*. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT*, vol. 150(3), pp. 223-239.
- MENÉNDEZ MARTÍNEZ, J. 2011.** *Desarrollo de ecuaciones de biomasa para la estimación de producción de diferentes clones de salix en una plantación energética*. Proyecto Fin de carrera presentado en Mieres (Universidad de Oviedo)
- PÉREZ-CRUZADO, C; SANCHEZ-RON, D; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R; HERNÁNDEZ, M.J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M.N.; CAÑELLAS, I; SIXTO, H, 2013.** *Biomass production assessment and contribution to country-scale energy demands from Populus spp. short rotation irrigated crops in Spain*. *GCB-Bioenergy*.
- PLANELLES, R.; OLIET, J.A.; ARTERO, F.; LÓPEZ, M., 2000.** *Efecto de distintas dosis N-P-K sobre la calidad funcional de planta de Ceratonia siliqua. Respuesta en plantación*.
- PLASTER, E.J. 1997.** *La ciencia del suelo y su manejo*. Ed. Paraninfo (edición año 2000)
- PROUPÍN CASTIÑEIRAS, J., 1998.** *Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México)*

mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad. Universidad de Santiago de Compostela.

RYYNÄNEN, L.; ARONEN, T., 2005. *Genome fidelity during short- and long-term tissue culture and differentially cryostored meristems of silver birch (Betula pendula).* Plant Cell, Tissue and Organ Culture (2005) 83, pp. 21-32.

SINGH R. N. 2002. *Biorrestauración de escombreras mediante técnicas innovadoras, Nagpur (India).* National Environmental Engineering Research Institute (NEERI).

SIXTO, H.; HERNÁNDEZ, M.J.; BARRIO, M.; CARRASCO, J.; CAÑELLAS, I. 2007. *Plantaciones del género Populus para la producción de biomasa con fines energéticos: Revisión.* Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 2007 16(3), pp. 277-294. INIA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria).

SMART L.B.; VOLK T.A.; LIN J.; KOPP, R.F.; PHILLIPS I.S.; CAMERON K.D.; WHITE E.H.; ABRAHAMSON L.P. 2005. *Mejora genética de los cultivos de sauce (Salix sp.) con fines bioenergéticos y medioambientales en los Estados Unidos.* Publicado en Unasylnva: Revista Internacional de Selvicultura e Industrias Forestales (Italia), 221 - vol.56, pp.51-55.

THARAKAN P.J., VOLK T.A., ABRAHAMSON L.P., WHITE E.H., 2005. *Evaluating the impact of three incentive programs on the economics of cofiring willow biomass with coal in New York State.* Energy Policy vol. 33, 337-347.

VALJAKKA, M.; ARONEN, T.; KANGASJÄRVI, J.; VAPAAVUORI, E.; HÄGGMAN, H., 2000. *Genetic transformation of silver birch by particle bombardment.* Tree Physiology 20, 607-613 (Victoria, Canada).

VANDE WALLE, I.; VAN CAMP, N.; VAN DE CASTEELE, L.; VERTHEYEN, K.; LERNEUR, R. 2007. *Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flandes (Belgium).* Biomass and Bioenergy, vol.31, pp. 267-275.

Páginas web consultadas

ESF. College of Environmental Science and Forestry (Ultimo acceso 15/06/2013)

<http://www.esf.edu/>

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (Ultimo acceso 07/07/2013)

<http://www.idae.es/>

Sciencedirect – Buscador de artículos científicos. (13/07/2013)

<http://www.sciencedirect.com/>

Scirus, *for scientific information only* – Buscador de artículos científicos. (13/07/2013)

<http://www.scirus.com/>

Scopus – Buscador de artículos científicos. (Ultimo acceso 12/07/2013)

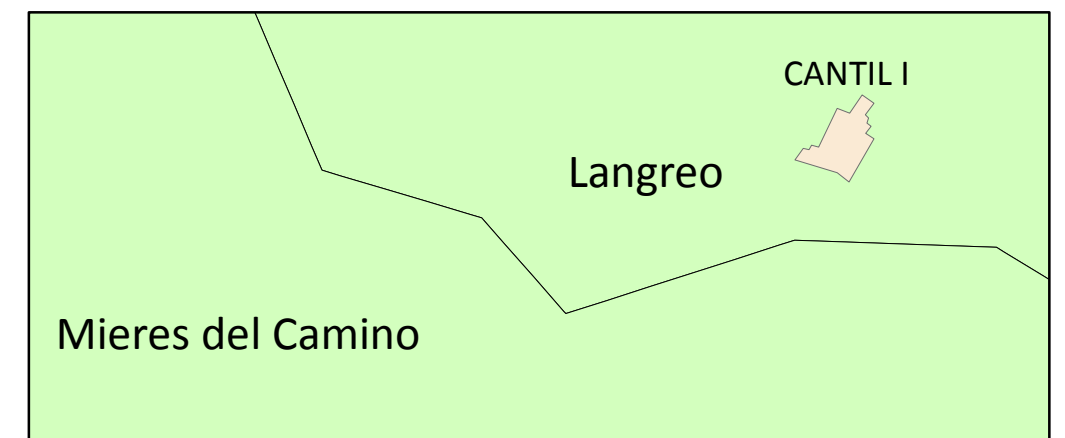
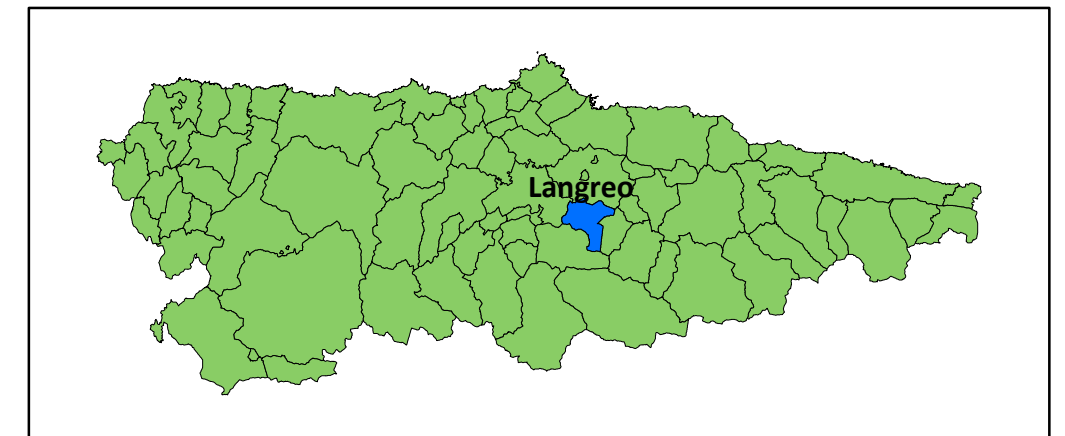
<http://www.scopus.com/home.url>

WOK (Web of Knowledge) – Buscador de artículos científicos gestionado por La Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) (Ultimo acceso 12/07/2013)

<http://www.accesowok.fecyt.es/>

ANEXO I

PLANO FINAL: Estimación del poder calorífico de la plantación (MJ) con el clon Monviso.



Leyenda

Bloques

- Bloque 1
- Bloque 2
- Bloque 3

Métodos de fertilización

- F0 (Testigo)
- F1
- F2

Estimación de biomasa y poder calorífico del clon Monviso (MJ/parcela)

- | | |
|--|---|
| 0,00 - 738,08 | 2822,61 - 3742,36 |
| 738,09 - 1456,02 | 3742,37 - 4816,09 |
| 1456,03 - 2822,60 | 4816,10 - 10925,04 |

Título del proyecto: "Análisis de la Potencialidad Productiva en Plantaciones Energéticas mediante Sistemas de Información Geográfica (Estudio en Cantil I, Langreo)"



Máster en Teledetección y SIG



Título del plano: "Estimación del poder calorífico de la plantación (MJ) con el clon *Monviso*"

Sistema de Coordinadas:
ETRS89 UTM Zona 30

Escala:
1:1.400

Fecha:
15/07/2013

Autora:
Natalia Ferreira Losa

ANEXO II

Datos edáficos y de crecimiento

Datos edáficos

Características químicas del suelo:

Parcela	pH	C.E.	P	N	MO	C	C/N	Ca	K	Mg	Na	Al	CICE
	H ₂ O (1:2,5)	dS/m	ppm	%	%	%	%	Cmol ₍₊₎ /kg	Cmol ₍₊₎ /kg	Cmol ₍₊₎ /kg	Cmol ₍₊₎ /kg	Cmol ₍₊₎ /kg	Cmol ₍₊₎ /kg
1BF0	6,69	0,10	4,97	0,20	4,05	2,35	11,52	5,81	0,36	1,25	1,25	1,41	10,07
1BF1	6,62	0,16	6,18	0,22	3,95	2,29	10,27	5,92	0,37	2,39	1,00	1,41	11,09
1BF2	6,20	0,12	6,78	0,24	3,45	2,00	8,47	4,96	0,37	1,17	1,17	1,36	9,02
1PaF0	7,12	0,18	4,67	0,18	3,40	1,97	10,82	7,02	0,27	1,60	0,60	1,11	10,60
1PaF1	7,09	0,16	4,52	0,28	4,30	2,49	8,86	6,95	0,35	1,81	0,81	1,07	11,00
1PaF2	7,18	0,21	5,27	0,29	4,40	2,55	8,73	7,19	0,38	2,90	1,20	1,11	12,77
1PbF0	6,97	0,21	4,27	0,22	4,55	2,64	12,17	6,54	0,39	2,10	1,10	1,34	11,46
1PbF1	7,12	0,19	3,46	0,24	4,45	2,58	10,80	7,24	0,29	2,01	1,01	1,01	11,55
1PbF2	5,39	0,11	8,28	0,29	4,35	2,52	8,84	3,96	0,44	1,90	0,90	1,93	9,13
1PmF0	5,45	0,15	4,08	0,19	4,00	2,32	12,15	3,47	0,31	2,28	1,28	1,86	9,20
1PmF1	7,14	0,18	7,53	0,23	3,75	2,18	9,69	7,21	0,41	1,67	0,67	1,11	11,07
1PmF2	7,29	0,15	4,37	0,24	3,50	2,03	8,42	7,28	0,37	2,74	0,74	0,99	12,12
1SaF0	7,29	0,16	5,27	0,17	3,75	2,18	12,67	7,49	0,38	2,06	1,06	0,98	11,97
1SaF1	6,68	0,15	5,42	0,23	3,95	2,29	9,79	5,79	0,36	1,23	1,23	1,26	9,85
1SaF2	6,88	0,20	7,23	0,26	4,35	2,52	9,62	6,41	0,38	1,86	0,86	1,23	10,74
1SvF0	7,12	0,16	4,22	0,18	3,60	2,09	11,68	7,17	0,45	2,45	1,05	1,21	12,31
1SvF1	7,18	0,25	3,92	0,25	4,55	2,64	10,69	7,18	0,48	1,80	1,20	1,10	11,77
1SvF2	7,13	0,21	3,46	0,26	4,00	2,32	8,82	7,07	0,31	1,91	0,91	1,03	11,23
2BF0	7,00	0,15	6,93	0,17	3,75	2,18	12,90	6,76	0,38	1,61	1,11	1,04	10,89
2BF1	7,26	0,18	8,76	0,17	2,65	1,54	8,85	7,12	0,25	1,77	1,17	0,96	11,27
2BF2	6,68	0,09	9,64	0,19	2,00	1,16	6,20	6,27	0,27	1,44	1,14	1,38	10,50
2PaF0	6,96	0,14	5,87	0,18	3,75	2,18	12,46	6,85	0,27	1,54	1,24	1,11	11,00
2PaF1	6,31	0,10	9,08	0,21	3,85	2,23	10,42	5,25	0,34	1,41	0,41	1,31	8,71
2PaF2	6,87	0,13	7,98	0,23	3,35	1,94	8,55	6,45	0,28	1,48	0,48	1,32	9,99
2PbF0	7,16	0,13	6,18	0,14	2,90	1,68	11,92	6,78	0,38	1,49	0,49	1,10	10,24
2PbF1	6,87	0,13	9,44	0,25	4,40	2,55	10,28	6,61	0,38	1,87	1,17	1,23	11,26
2PbF2	6,12	0,11	9,94	0,26	4,40	2,55	9,73	4,63	0,42	2,09	1,09	1,49	9,72
2PmF0	7,22	0,21	5,27	0,17	3,80	2,20	13,10	7,27	0,28	1,52	1,12	1,09	11,27
2PmF1	7,12	0,17	8,74	0,24	4,00	2,32	9,79	7,24	0,46	1,90	0,90	0,92	11,41
2PmF2	6,96	0,28	11,90	0,25	3,55	2,60	10,36	6,84	0,37	2,11	1,11	1,17	11,59
2SaF0	6,52	0,14	6,02	0,21	4,65	2,70	12,68	6,12	0,40	1,43	1,23	1,10	10,29
2SaF1	7,00	0,14	3,77	0,24	3,85	2,23	9,41	6,53	0,26	2,58	1,08	1,18	11,63
2SaF2	6,05	0,11	6,78	0,24	4,10	2,38	9,84	4,36	0,43	1,50	1,30	1,52	9,10
2SvF0	7,09	0,14	6,18	0,12	2,65	1,54	12,42	6,63	0,26	1,19	1,19	0,92	10,18
2SvF1	7,12	0,29	6,18	0,25	4,45	2,58	10,45	7,18	0,35	1,69	1,19	0,83	11,24
2SvF2	6,80	0,10	3,31	0,25	3,30	1,91	7,52	6,06	0,37	2,04	1,04	1,26	10,77

3BF0	7,11	0,11	7,38	0,15	2,65	1,54	10,41	6,94	0,32	1,38	1,18	0,89	10,70
3BF1	6,87	0,13	9,92	0,16	2,80	1,62	10,00	6,02	0,36	1,28	1,08	1,20	9,93
3BF2	6,88	0,12	13,72	0,18	2,90	1,68	9,13	5,94	0,36	1,49	1,19	1,13	10,10
3PaF0	6,93	0,12	8,28	0,17	3,45	2,00	11,63	6,61	0,36	1,72	1,12	1,30	11,11
3PaF1	7,13	0,17	9,49	0,19	3,25	1,89	9,74	7,12	0,26	1,79	1,19	0,91	11,28
3PaF2	7,11	0,11	12,20	0,27	4,22	2,45	9,04	6,98	0,34	2,01	1,01	0,99	11,34
3PbF0	6,68	0,14	6,04	0,12	2,25	1,31	10,65	6,07	0,38	1,65	1,15	1,23	10,49
3PbF1	7,23	0,13	9,19	0,20	3,15	1,83	8,97	7,28	0,38	1,57	1,17	0,87	11,27
3PbF2	7,46	0,17	11,86	0,22	3,10	1,80	8,26	8,20	0,31	1,74	1,24	0,76	12,25
3PmF0	7,20	0,14	8,74	0,15	3,25	1,89	12,60	7,10	0,37	1,66	0,66	0,92	10,71
3PmF1	7,33	0,15	6,94	0,18	3,35	1,94	10,84	7,47	0,37	1,25	1,25	0,76	11,10
3PmF2	6,58	0,11	11,60	0,19	2,40	1,39	7,43	5,84	0,33	1,24	1,04	1,21	9,66
3SaF0	6,46	0,10	7,32	0,18	3,50	2,03	11,60	5,72	0,26	1,80	1,20	1,22	10,21
3SaF1	6,79	0,11	6,11	0,20	3,20	1,86	9,49	6,14	0,48	1,67	1,27	1,27	10,83
3SaF2	6,65	0,09	7,53	0,23	3,25	1,89	8,36	5,97	0,47	1,27	1,27	1,20	10,18
3SvF0	6,46	0,14	4,16	0,17	3,20	1,86	11,14	6,12	0,27	1,67	1,27	1,20	10,53
3SvF1	6,90	0,12	8,28	0,18	3,25	1,89	10,80	6,57	0,46	1,91	1,11	1,19	11,23
3SvF2	5,65	0,07	12,05	0,18	2,35	1,36	7,39	3,61	0,49	1,02	1,02	1,74	7,89

Características físicas del suelo (textura y profundidad):

Parcela	Arena	Limo	Arcilla	Profundidad efectiva
	%	%	%	cm
1BF0	63,41	15,34	21,25	29,70
1BF1	56,03	20,53	23,44	29,20
1BF2	62,77	14,32	22,91	22,00
1PaF0	53,16	22,05	24,79	20,00
1PaF1	52,43	18,51	29,06	26,00
1PaF2	45,69	23,17	31,14	28,00
1PbF0	50,72	20,76	28,52	28,00
1PbF1	52,98	22,14	24,88	37,00
1PbF2	50,08	19,92	30,00	23,50
1PmF0	55,42	17,34	27,24	31,20
1PmF1	47,56	20,98	31,46	27,10
1PmF2	57,84	22,48	19,68	34,00
1SaF0	61,59	16,08	22,33	31,80
1SaF1	55,71	19,12	25,17	24,80
1SaF2	55,56	23,69	20,75	21,00
1SvF0	53,80	19,03	27,17	21,50
1SvF1	55,28	21,57	23,15	24,60
1SvF2	48,34	24,48	27,18	22,00
2BF0	48,51	24,06	27,43	30,60

2BF1	57,28	18,70	24,02	27,00
2BF2	44,98	19,27	35,75	21,00
2PaF0	56,91	18,86	24,23	33,10
2PaF1	54,56	16,05	29,39	40,00
2PaF2	63,72	13,96	22,32	28,50
2PbF0	58,23	20,77	21,00	28,00
2PbF1	50,78	20,27	28,95	26,20
2PbF2	46,27	23,58	30,15	29,50
2PmF0	55,59	15,68	28,73	20,00
2PmF1	58,44	19,40	22,16	35,70
2PmF2	59,08	19,10	21,82	29,80
2SaF0	56,79	20,17	23,04	25,00
2SaF1	55,03	19,68	25,29	35,70
2SaF2	41,17	26,48	32,35	27,50
2SvF0	58,39	15,61	26,00	32,60
2SvF1	60,71	16,85	22,44	25,60
2SvF2	37,22	27,57	35,21	17,10
3BF0	60,90	16,96	22,14	35,60
3BF1	57,04	20,06	22,90	28,00
3BF2	58,31	20,85	20,84	25,20
3PaF0	54,29	18,09	27,62	23,60
3PaF1	60,86	21,07	18,07	21,90
3PaF2	66,80	12,78	20,42	27,00
3PbF0	47,31	23,72	28,97	31,50
3PbF1	60,32	17,81	21,87	41,00
3PbF2	34,66	26,15	39,19	49,50
3PmF0	46,38	22,59	31,03	42,00
3PmF1	61,26	17,89	20,85	35,50
3PmF2	77,59	11,21	11,20	25,60
3SaF0	48,48	21,70	29,82	31,70
3SaF1	42,57	25,53	31,90	30,20
3SaF2	40,97	26,35	32,68	24,00
3SvF0	53,21	19,28	27,51	27,30
3SvF1	60,85	16,78	22,37	34,00
3SvF2	62,22	18,34	19,44	26,50

Datos de crecimiento

Parcela	Altura (cm)	D25 (cm)	V (cm ³ /pie)	Brotos	Biomasa Fracción fina (g/pie)	Biomasa Fracción intermedia (g/pie)	Biomasa Fracción gruesa (g/pie)
1BF0	59,85	0,48	6,63	1,00	56,88	23,75	
1BF1	23,33	0,19	4,57	0,42	22,90	11,80	
1BF2	30,37	0,26	6,87	0,33	46,67	30,89	
1PaF0	68,67	0,51	8,70	1,91	93,64	91,80	
1PaF1	60,51	0,52	27,08	0,25	436,30	309,00	416,50
1PaF2	71,12	0,67	20,60	0,83	192,40	155,20	47,30
1PbF0	85,19	0,66	13,83	1,58	133,90	102,70	
1PbF1	88,04	0,62	12,16	2,00	190,40	146,30	14,70
1PbF2	31,81	0,32	36,05	0,17	513,70	256,60	297,30
1PmF0	123,60	0,90	42,18	1,58	522,40	301,10	170,80
1PmF1	91,52	0,61	12,24	1,92	149,10	124,50	
1PmF2	43,11	0,37	15,99	0,25	574,10	387,50	382,50
1SaF0	52,58	0,30	2,42	2,25	41,50	25,30	
1SaF1	126,47	0,95	60,20	2,64	421,00	329,10	102,70
1SaF2	75,09	0,58	24,61	0,42	183,40	158,90	6,20
1SvF0	27,34	0,20	2,76	0,33	47,40	86,20	
1SvF1	13,27	0,08	1,94	0,17	37,20	77,40	
1SvF2	150,66	1,01	76,26	1,75	72,40	122,10	
2BF0	71,62	0,50	8,10	1,00	40,90	30,70	
2BF1	19,26	2,30	39,60		52,80	32,10	
2BF2	57,46	0,54	12,38	0,67	21,30	21,10	
2PaF0	92,82	0,67	22,91	1,17	159,50	162,00	27,60
2PaF1	79,38	0,74	42,54	0,85	355,90	245,80	228,10
2PaF2	157,19	1,19	151,87	1,42	200,10	191,70	48,20
2PbF0	27,61	0,27	11,12	0,58	255,40	154,50	55,90
2PbF1	130,09	1,17	90,15	1,42	524,00	324,70	366,80
2PbF2	51,91	0,60	44,69	0,58	476,75	307,75	309,13
2PmF0	115,47	0,75	22,47	1,75	126,10	133,90	
2PmF1	83,80	0,73	70,51	0,33	668,30	431,50	427,70
2PmF2	160,68	1,29	204,80	1,42	854,50	440,70	908,00
2SaF0	80,78	0,59	27,84	2,00	148,90	195,70	4,20
2SaF1	44,63	0,31	6,19	1,08	173,50	140,20	
2SaF2	123,78	0,84	50,76	1,50	301,30	297,10	17,60
2SvF0	27,15	0,19	45,00	0,25	83,10	170,00	
2SvF1	173,59	1,20	104,07	2,00	274,11	800,78	164,33
2SvF2	207,32	1,41	152,06	2,50	104,44	245,44	90,78
3BF0	92,26	0,66	14,74	1,08	50,78	43,00	
3BF1	34,61	0,29	8,41	0,25	30,78	20,89	
3BF2	27,56	0,22	3,76	0,58	34,70	27,10	

3PaF0	73,99	0,67	33,70	1,25	227,40	275,60	108,10
3PaF1	69,70	0,60	38,85	1,08	413,40	250,60	233,90
3PaF2	120,87	1,04	180,39	0,67	830,30	469,80	1145,80
3PbF0	138,76	1,08	58,84	1,25	255,80	195,80	
3PbF1	75,10	0,72	55,08	0,50	479,86	203,71	201,86
3PbF2	78,60	0,70	29,91	1,08	412,30	222,80	263,30
3PmF0	86,00	86,00	86,00	2,50	125,80	113,40	26,70
3PmF1	167,86	1,29	180,90	1,58	672,60	288,40	357,30
3PmF2	195,43	1,47	369,21	0,92	1235,90	791,80	1820,80
3SaF0	136,38	0,75	32,48	2,92	117,90	152,50	
3SaF1	136,44	0,82	55,59	1,67	288,30	272,10	15,50
3SaF2	142,03	0,88	52,76	3,08			
3SvF0	169,69	1,10	78,35	1,92	89,83	289,33	19,67
3SvF1	179,46	1,22	103,26	2,08	156,56	345,11	276,33
3SvF2	360,63	1,99	499,56	3,42	231,30	825,90	861,60