

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ciencias Ambientales



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio del efecto a corto plazo de un tratamiento selvícola en una masa forestal de *Pinus halepensis* en el monte de la Calderona (Serra) sobre propiedades químicas, biológicas y bioquímicas del suelo”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Mónica Peñas Llop

Tutor/a:

Cristina Lull Noguera

GANDIA, 2017

RESUMEN

El cuidado y conservación de los ecosistemas forestales es un tema que, actualmente, resulta de interés mundial, ya que se tratan de la solución a diferentes problemas medioambientales, sociales y culturales. Hacer uso de prácticas de manejo de tierras para asegurar la protección, conservación, restauración y aprovechamiento de los recursos forestales producen alteraciones en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y bioquímicas del suelo, las cuales pueden llegar a afectar a las funciones del mismo. En este trabajo se han estudiado las propiedades de dos parcelas, una tratada y otra control, para poder comparar las propiedades de cada una y así conocer como varían en un periodo corto de tiempo. El tratamiento elegido ha sido el aclareo, el cual ha producido cambios en propiedades como el nitrógeno mineral, la humedad, el carbono orgánico soluble, la respiración, así como en procesos como la mineralización, la lixiviación y la nitrificación. Además, se ha podido observar a lo largo de todo el estudio que en la parte central de la ladera estas propiedades mostraban resultados que diferían bastante de los obtenidos en la zona superior y posterior. Mediante ayuda bibliográfica se ha intentado dar una explicación lógica a este comportamiento y a los resultados obtenidos.

Palabras clave: calidad del suelo, ecosistema forestal, ciclo de nutrientes, silvicultura, propiedades del suelo.

ABSTRACT

The care and conservation of forest ecosystems is an issue that is currently of worldwide interest, since it deals with the solution to different environmental, social and cultural problems. Making use of land management practices to ensure the protection, conservation, restoration and use of forest resources produce alterations in the physicochemical, microbiological and biochemical properties of the soil, which may affect the functions of the same. In this study we have studied the properties of two plots, one treated and one control, in order to be able to compare the properties of each one and thus to know how they vary in a short period of time. The treatment chosen has been thinning, which has produced changes in properties such as mineral nitrogen, moisture, soluble organic carbon, respiration, as well as processes such as mineralization, leaching and nitrification. In addition, it has been observed throughout the study that in the central part of the hillside these properties showed results that were quite different from those obtained in the upper and posterior zone. Through bibliographic help, an attempt has been made to give a logical explanation to this behavior and to the results obtained.

Key words: soil quality, forest ecosystem, nutrient cycle, silviculture, soil properties

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Importancia de los ecosistemas forestales	1
1.2. Importancia de la biodiversidad forestal	3
1.3. Bosque mediterráneo	4
1.4. Importancia del suelo y su protección	4
1.5. Funciones de los ecosistemas forestales	7
1.6. Importancia del carbono en el suelo	8
1.7. Importancia del nitrógeno en el suelo	10
1.8. Cambio climático y ecosistemas forestales	12
1.9. Tratamiento silvícola	14
1.9.1. Las claras	16
2. OBJETIVOS	18
3. MATERIAL Y MÉTODOS	19
3.1. Área de estudio: localización y caracterización	19
3.1.1. Geología y geomorfología	19
3.1.2. Climatología	20
3.1.3. Hidrografía	21
3.1.4. Flora	21
3.1.5 Fauna	22
3.2. Diseño experimental	23
3.3. Análisis del suelo	24
3.3.1 Humedad del suelo. Factor humedad	25
3.3.2 Materia orgánica	25
3.3.3 Carbono orgánico soluble	26
3.3.4 Carbono de la biomasa microbiana	27
3.3.5 Respiración microbiana	28
3.3.6 Nitrógeno	28
4. RESULTADOS	32
4.1. Caracterización del suelo	32
4.2. La humedad del suelo	33
4.2.1. Humedad en el mantillo	33
4.2.2. Humedad en el suelo mineral	34
4.3. Respiración	36
4.4. Carbono orgánico soluble (COS)	37

4.5. Carbono de la biomasa microbiana	38
4.6. Nitrógeno en el suelo mineral.....	39
4.6.1. Nitrógeno amoniacal.....	39
4.6.2. Nitrógeno nítrico	41
4.6.3. Nitrógeno mineral	42
4.7. Flujos de nitrógeno.....	43
4.7.1. Mineralización	43
4.7.2. Nitrificación	45
4.7.3. Lixiviación	45
4.8. Correlaciones entre variables.....	46
5. CONCLUSIONES.....	47
6. BIBLIOGRAFIA	48

Índice de Figuras

Figura 1. Funciones del suelo. Fuente: FAO.	5
Figura 2. Funciones designadas de los bosques del mundo. Fuente: FRA (2010).....	7
Figura 3. Ciclo global actual del carbono. Fuente: modificado de Schelesinger (1991).	8
Figura 4. Ciclo del Carbono y Nitrógeno con los principales procesos mediados por los microorganismos. Fuente: modificado de Macdonald y col. (2011).	9
Figura 5. Ciclo del nitrógeno en el suelo en ecosistemas forestales. Fuente: modificado de Schimel y Bennet (2004).	10
Figura 6. Localización de la zona de estudio.	19
Figura 7. Diagrama ombrotérmico. Fuente: elaboración propia.	20
Figura 8. Diagrama precipitación y temperatura en el periodo de muestreo.	21
Figura 9. Parcela control y parcela tratada durante el tratamiento silvícola.....	23
Figura 10. Vista aérea de las parcelas.	23
Figura 11. Puntos de muestreo.	24
Figura 12. Proceso de intercambio de la forma de la resina catiónica y aniónica.	30
Figura 13. Proceso de elaboración del tubo de resina.	31
Figura 14. Detalle de los tubos de resina en el campo.	31
Figura 15. Humedad (%) del mantillo en la primera fecha de muestreo. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	34
Figura 16. a) y b) Humedad (%) en suelo mineral de las parcelas Tratada y Control, en el muestreo inicial y final. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	35
Figura 17. Respiración basal (C-CO ₂ (mg kg ⁻¹ s)) en las parcelas Tratada (T) y Control (C) en el segundo periodo de muestreo.	36
Figura 18. Carbono orgánico soluble en el mantillo de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	37
Figura 19. Carbono orgánico soluble en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	38
Figura 20. CBM en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	39
Figura 21. a) Nitrógeno amoniacal en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de septiembre. b) Nitrógeno amoniacal en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de diciembre. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	40
Figura 22. Nitrógeno nítrico en el mantillo de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	41
Figura 23. a) Nitrógeno nítrico en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de septiembre. b) Nitrógeno nítrico en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de diciembre. Los datos	

señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	42
Figura 24. a) Nitrógeno mineral en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de septiembre. b) Nitrógeno mineral en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de diciembre. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	43
Figura 25. Mineralización por posición de las muestras y el tratamiento de la parcela. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	44
Figura 26. Nitrificación por posición de las muestras y el tratamiento de la parcela. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	45
Figura 27. Lixiviación por posición de las muestras y el tratamiento de la parcela. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).	45

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación bioclimática de la zona de estudio.	21
Tabla 2. Análisis realizados.....	24
Tabla 3. Características de las resinas de intercambio iónico.....	29
Tabla 4. Características físico-químicas de los suelos de las parcelas de estudio. Fuente: Sánchez (2015).	32
Tabla 7. Valores de coeficientes de correlación y nivel de significación. (*, ** y *** significativa a $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ y $p \leq 0,001$, respectivamente. NS, no significativa).	46

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia de los ecosistemas forestales

Los ecosistemas forestales son zonas paisajísticas dominadas por vegetación arbórea, arbustivas, de matorral o herbáceas. Se consideran comunidades biológicamente integradas de animales, plantas y microorganismos los cuales interactúan entre ellos, junto al substrato y la atmosfera.

Los bosques desempeñan importantes funciones ecológicas, sociales, económicas y culturales, de ahí su importancia. Se tratan de uno de los depósitos más importantes de biodiversidad, ofrecen hábitat a plantas, animales y microorganismos, proporcionan bienes (madera, leña, alimentos, aceites, resinas, productos farmacéuticos...) y servicios ecológicos, como su capacidad de retención del carbono, conservación del agua y control de la erosión.

Ambientalmente, la importancia del ecosistema forestal viene dada, especialmente si se trata de un ecosistema arbolado, por su capacidad de atenuación de los cambios de temperatura, la mejora en la calidad del aire al disminuir la concentración de CO₂ y generar O₂ y por su capacidad para mejorar la calidad del agua. A su vez, los ecosistemas forestales minimizan el impacto de la contaminación y ayudan a la diversificación biológica. Cabe destacar que en los bosques la velocidad del viento se ve disminuida debido a la masa forestal, la temperatura se suaviza (respecto a la temperatura exterior) y la humedad se ve favorecida debido a la retención. Otra de las razones por la que estos ecosistemas son importantes a nivel medioambiental viene dada por la capacidad de proporcionar refugio y alimento a los seres vivos que forman parte de él.

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define ecosistema como "un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional". La biodiversidad forestal en un ecosistema es de gran importancia, puesto que de ella depende indirectamente el equilibrio de los gases atmosféricos, la regulación del clima, el reciclado de nutrientes, el mantenimiento de ciclos hidrológicos y la creación del propio suelo.

Desde tiempos ancestrales, el ser humano se ha relacionado con el medio natural para asegurar su continuidad como especie y su supervivencia. Como se ha dicho anteriormente los bosques también desempeñan funciones sociales y económicas, pues de ellos se extraen parte de las materias primas necesarias para la creación de productos que se usan día a día.

No se puede hablar de medio natural y ser humano sin hacerlo también de avance tecnológico y desarrollo social. Antiguamente se veía la naturaleza como un bien del cual se podían extraer otros bienes, es decir, la naturaleza era el bien más preciado y era el que aseguraba la supervivencia por eso se la veía como el bien que más había que cuidar. La población era una población rural, campestre, la cual subsistía del cultivo de

sus tierras y por eso tenía que cuidarlas. Pero con el desarrollo de la especie humana ese pensamiento y esa unión naturaleza-hombre se ha ido perdiendo. El desarrollo social ha propiciado una transformación en las condiciones de vida del hombre, pues muchas tierras han sido abandonadas, sobre todo tras la revolución industrial. En esta época muchas de las personas que residían en poblaciones rurales decidieron trasladarse a centros urbanos para poder obtener una vida mejor, con un trabajo mejor remunerado y una calidad de vida mejor. Junto a este desarrollo social se ha producido un impetuoso desarrollo tecnológico, pues las condiciones de vida han cambiado, se ha reducido la mortalidad y se ha aumentado la esperanza de vida al nacer. Además, la población mundial se ha visto multiplicada en los últimos años, lo que ha producido una mayor demanda de materias primas, un aumento en la producción de alimentos, y una mayor demanda energética y una mayor necesidad de bienes de consumo.

La industrialización ha sido la principal causa de cambios en la naturaleza, pues ha afectado a la utilización de recursos energéticos, a los recursos hídricos, ha contribuido al aumento de los gases invernadero, así como a la sobreexplotación de terrenos produciendo la pérdida de fertilidad, aumento en la erosión, pérdida y degradación del suelo, etc. Si a todo esto se suma la gran cantidad de vertidos, el uso de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes los impactos son todavía mayores, pues no solo se ve afectado el suelo, también lo hace el aire (emisión de gases de efecto invernadero, cambio climático, lluvia ácida...) y el agua (vertidos de petróleo, eutrofización de aguas, etc.). Aire, suelo y agua están en un continuo contacto e interrelacionados entre sí, de forma que si uno de estos se ve afectado probablemente los otros dos también.

Es por todo esto que a la hora de realizar un tratamiento sobre una masa forestal es importante tener en cuenta todos los componentes que forman parte de este ecosistema, como son la biodiversidad, calidad del agua, producción de biomasa, calidad del suelo, así como las funciones socio-económicas que tiene lugar en esta masa.

Se precisa de una buena gestión y un manejo sostenible de los ecosistemas forestales. De forma que, antes de planificar cualquier manejo se precisa realizar un estudio de los factores que podrían verse afectados por los cambios producidos, así como el legado histórico de esa masa forestal. Es necesario tener un conocimiento de la economía social y global, de los protocolos medioambientales y convenciones, de los factores biológicos, físicos y químicos, así como de los cambios medioambientales que se han producido.

Como se ha dicho anteriormente el suelo es el bien más importante que existe hoy en día en el planeta Tierra, pero es un recurso no renovable, pues la tasa de recuperación es muy lenta y se precisan de cientos de años para la formación de 1 cm de suelo. Una gestión y manejo sostenible es imprescindible para la protección de los suelos y los ecosistemas, por eso se precisa de la realización de diferentes análisis que ayuden a obtener la mayor información posible sobre la zona que se va a tratar.

Uno de los análisis más importantes es el del suelo, junto con el de la biodiversidad de la zona, pues muchas veces se ha optado por la realización de repoblaciones y restauraciones forestales que han dado lugar a masas monoespecíficas ya que no se ha

tenido en cuenta la vegetación natural, lo que aumenta la vulnerabilidad de esa masa forestal. Al aumentar la vulnerabilidad de una masa forestal se produce una mayor probabilidad a que se contraigan plagas, enfermedades e incluso a que aumente el riesgo de incendio.

Todo esto solo confirma la necesidad de desarrollar medidas de gestión que se encarguen de asegurar y afianzar la capacidad de superación y recuperación de las poblaciones forestales. Una mayor riqueza de las especies y de los ejemplares que forman esa masa vegetal mejoran los atributos funcionales de las comunidades (producción y estabilidad). La forma de actuación es sencilla, se pretende la conversión de masas monoespecíficas a masas mixtas mediante la introducción de especies autóctonas adaptadas a las condiciones de la zona. Con los tratamientos selvícolas de mejora y regeneración se pretende aumentar la riqueza de las especies, lo que permite promover los procesos de actividad biológica enriqueciendo así la calidad del suelo. Esto es lo que se denomina llegar a la sostenibilidad del sistema.

1.2. Importancia de la biodiversidad forestal

La biodiversidad forestal comprende la biodiversidad dentro de los bosques. Esta está formada tanto por especies de plantas como de animales y microorganismos, no solo especies arbóreas.

La biodiversidad forestal es uno de los recursos esenciales para la vida humana, pues de ella depende tanto la salud como la prosperidad de la especie y el orden del medio ambiente. Se incluye en esta biodiversidad las todas las especies mundiales, así como sus genes consecutivos. La pérdida de esta biodiversidad, así como la de genes, especies y ecosistemas, supone una amenaza tanto para la supervivencia del ser humano como para la supervivencia de otros organismos. Cabe destacar que todas las especies son de fundamental importancia dentro de un ecosistema, pues las especies menos visibles como podrían ser hongos o incluso algunos insectos pueden ser indicadores de un cambio en el ambiente y son esenciales para el funcionamiento de ese ecosistema.

Existen cuatro propósitos principales para la realización de una evaluación de la biodiversidad (Burley y Gauld, 1994; Bachmann, Köhl y Päivinen, 1998). El primero sería una comprensión científica de la función, estructura y evaluación del ecosistema, para poder basarse a la hora de gestionar y administrar los recursos proporcionados por ese ecosistema así aseguramos la productividad. El segundo propósito sería el de conservar y desarrollar germoplasma, así se asegura la mejora genética de aquellas especies destinadas a la plantación y la agrosilvicultura. El tercer propósito estaría relacionado con las acciones humanas y los cambios ambientales tanto por causas naturales como antropogénicos, y sus efectos sobre el medio ambiente. El último propósito estaría relacionado con la conservación de la biodiversidad por razones éticas, estéticas, culturales e investigaciones científicas. Este último se basa en la elección de zonas prioritarias para garantizar la conservación de las especies.

Cabe tener en cuenta que son diversos los factores que afectan a la biodiversidad como serían los cambios estacionales (corta duración) y los cambios temporales (larga duración), variación del número de individuos, la abundancia o escasez de ciertas especies o recursos, la cantidad de animales migrantes que llegan y salen del ecosistema, la fase de desarrollo del ecosistema (desde el suelo hasta las copas de los árboles); y la escala geográfica, entre otros.

Los principales valores ecológicos de la biodiversidad forestal vienen dados por su capacidad moderadora del clima, intervienen en los ciclos hidrológicos, así como en el ciclo del carbono y del nitrógeno, ayudan a la conservación del suelo.

La pérdida se atribuye a la pérdida de hábitats, introducción de especies exóticas, la sobreexplotación y la contaminación ambiental. La sobreexplotación para la conseguir nuevas tierras de cultivo, así como para la extracción de madera, produce un cambio en el microclima y la estructura de dicho ecosistema. Los cambios microclimáticos y estructurales suponen un cambio en la biodiversidad, ya que estas nuevas condiciones favorecen el crecimiento de especies que suelen vivir en el bosque secundario o en los límites de ese bosque. Sin embargo, son las especies de sotobosque las que se ven afectadas y sufren un gran declive, permaneciendo durante largos periodos de tiempo con un número reducido de individuos o incluso llegando a desaparecer.

1.3. Bosque mediterráneo

La región mediterránea se caracteriza por poseer un clima en el cual es muy común la existencia de un periodo de sequía en la época estival que puede llegar a durar entre 2 y 4 meses. Por otra parte, las precipitaciones pueden ser muy variantes, desde los 1500 mm hasta menos de 350 mm (frecuentes en la época otoño-invierno).

La característica principal de los bosques mediterráneos viene dada por la presencia de ejemplares perennifolios (encinares, alcornoques, enebrales, etc.). La vegetación típica suele ser xerófila (adaptada a vivir en lugares o ambientes secos), ya que deben soportar la época estival y como se ha dicho anteriormente suele ser una época dominada por la sequía. La especie dominante suele ser la encina, mientras que el sotobosque suele estar dominado por especies como el lentisco, el aladierno, lianas y, en los claros, predominan jaras, romero y tomillo.

En las zonas más cálidas estos bosques son acompañados o remplazados por pinares de pino carrasco, también conocido como el pino de la costa mediterránea. Se encuentra en crestones rocosos y laderas soleadas. Desde el nivel del mar hasta los 800-1000 m de altitud en el interior.

1.4. Importancia del suelo y su protección

La importancia del suelo viene dada, como se ha dicho anteriormente, por el hecho de que se trata de un recurso natural no renovable a escala temporal humana, ya que su proceso de formación puede tardar desde cientos hasta miles de años. Se trata de un sistema dinámico que ejerce funciones de soporte biológico, interviene en los ciclos de

carbono, nitrógeno, fósforo y azufre como parte fundamental en el equilibrio de los ecosistemas, hace función de filtro y retiene sustancias ejerciendo como amortiguador y protegiendo las aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos, modifica la estructura consiguiendo la mineralización, trasforma compuestos orgánicos descomponiéndolos, proporciona materias primas renovables y no renovables las cuales son extraídas y usadas por el ser humano.

Se trata de un recurso clave en las funciones ecológicas de los ecosistemas, pero es un recurso que ha sido subestimado por el ser humano. La intervención humana sobre este ha alterado ciclos biogeoquímicos al realizar actividades productivas intensas como es el caso de las prácticas agrícolas, la ganadería, o forestales inadecuadas produciendo la pérdida de fertilidad y productividad del suelo, originando problemas ecológicos que podrían poner en peligro la supervivencia de la especie humana. Estos problemas ecológicos están relacionados con la gran degradación que se está produciendo en el suelo

Las relaciones entre el suelo y la masa forestal son muy complejas. Tanto el suelo como los bosques están vinculados y presentan repercusiones mutuas y sobre el medio ambiente en general. Los suelos, los bosques y sus interacciones cumplen funciones clave para garantizar la supervivencia de la especie humana, así como para mantener un medio ambiente sano.

Pero la verdadera importancia del suelo viene dada por sus funciones y por las amenazas que acarrea sobre él. Las principales funciones del suelo vienen dadas en la Figura 1.



Figura 1. Funciones del suelo. Fuente: FAO.

Las principales funciones del suelo serían las siguientes:

- **Alimentos y producción de biomasa.** Los alimentos como los productos agrícolas, esenciales para la vida del ser humano y la silvicultura, dependen del suelo. El 95% de los alimentos se producen directa o indirectamente en los suelos. La vegetación, cultivos, masas forestales, etc., necesitan del suelo para la obtención de agua y nutrientes, así como para tener un soporte físico.

- Almacenaje, filtración y transformación. El suelo es capaz de almacenar minerales, materia orgánica, agua, nutrientes y una gran cantidad de compuestos químicos. Además, el suelo es un gran biorreactor químico. El suelo es un filtro natural de las aguas subterráneas (reserva de agua potable) y libera CO₂, y otros gases a la atmósfera.
- Hábitat y reserva energética. El suelo actúa como hábitat tanto para microorganismos que forman parte de él como para organismos que viven sobre él, cada uno con un genotipo irremplazable. Es por esto que las funciones ecológicas que presenta son esenciales y muy importantes
- Entorno físico y cultural para la humanidad. El suelo es la base de las actividades humanas y es un elemento del paisaje, así como patrimonio cultural.
- Fuente de materias primas: El suelo como recurso es capaz de proporcionar arcillas, arenas, minerales y turba, las cuales son usadas para la producción de otros materiales, como serían los materiales de construcción.

Debido a las funciones vitales desempeñadas por el suelo se hace imprescindible asegurar su estado para garantizar la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, cada vez son más las amenazas que presenta. Las actividades humanas disminuyen la disponibilidad y variabilidad del suelo a largo plazo. Estas amenazas son muy complejas y suelen darse de forma simultánea, por lo que el efecto tiende a agravarse. Si no se toman medidas para evitar estas amenazas el suelo puede llegar a tal punto de degradación que no pueda cumplir ninguna de sus funciones esenciales. Se ha estimado que unos 52 millones de hectáreas están afectadas, en la UE, por alguna de estas amenazas. Esta degradación puede darse de forma natural, especialmente, por factores climáticos (sequía, aridez, regímenes de precipitaciones) o por acciones humanas, como sería el caso de la deforestación, deterioro de la estructura del suelo, exceso de pastoreo). Según el Atlas Mundial de la Desertificación (ONUMA 1992 y CE, 1994) en España las zonas más afectadas por ese proceso sería la zona central y el sudeste del país. Si se suma el cambio climático, el cual agrava e incide en todos los procesos de degradación, la situación del suelo cada vez se ve más afectada.

Las principales amenazas que pueden afectar a los suelos son la erosión, la pérdida de materia orgánica, la contaminación del suelo, el sellado de los suelos, su compactación, salinización, pérdida de biodiversidad e inundaciones y deslizamientos de tierras.

En relación con la pérdida de materia orgánica indicar que ésta se compone de restos de animales, plantas (parte aérea y raíces) y microorganismos, biomasa microbiana, excrementos, secreciones y excreciones solubles de plantas y animales, y humus. La materia orgánica se encuentra en un ciclo constante de acumulación y descomposición, liberando CO₂ a la atmósfera y recapturándolo mediante la fotosíntesis. La materia orgánica representa un factor determinante de la fertilidad y la erosión del suelo. Limita que la contaminación difusa del suelo acabe llegando al agua, garantizando la capacidad de cohesión y amortiguación del suelo. Tanto las actividades agrícolas, como las forestales tienen una gran incidencia en la materia orgánica del suelo. La acumulación de materia orgánica en el suelo se ve favorecida con el uso de técnicas de explotación adecuadas como el uso de estiércol y compost, la agricultura de conservación y

ecológica, pastizales permanentes, cubrición del suelo, el cultivo en fajas o según curvas de nivel, etc.

La pérdida de biodiversidad desde microorganismos a organismos más complejos produce la pérdida de propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo, necesarias para la fertilidad del suelo. La pérdida de biodiversidad del suelo hace a los suelos más vulnerables a la erosión.

1.5. Funciones de los ecosistemas forestales

Para evaluar las funciones de un ecosistema forestal se tendrá en cuenta su aportación a la conservación del medio físico y social. Por una parte, está la conservación de la biodiversidad forestal en el ecosistema contribuye a mejorar el equilibrio de los gases atmosféricos, el mantenimiento de los ciclos hidrológicos, la regulación del clima, el reciclado de los nutrientes, y la creación de suelo (Daily, 1997). La diversidad de especies aumenta la capacidad productiva de muchos ecosistemas forestales y su adaptación a las nuevas condiciones (Johnson y col., 1996).

Por otra parte, hay que destacar la importancia de los bosques para favorecer la vida en la Tierra, ya que se encarga de las capturas de CO₂ debidas a la forestación y a la gestión forestal sostenible, ayudando a reducir los efectos del cambio climático. Además, los bosques se gestionan para favorecer diferentes usos sociales.

La preocupación por los bosques viene dada por la importancia de los bosques en el ciclo global del carbono según la última publicación de la FAO: Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 (FRA 2010).

Según los datos obtenidos por FRA (2010) que se pueden observar en la Figura 2 alrededor de un 30% de los bosques son destinados para la obtención de productos tanto maderables como no maderables y un 24% están designados a usos múltiples.

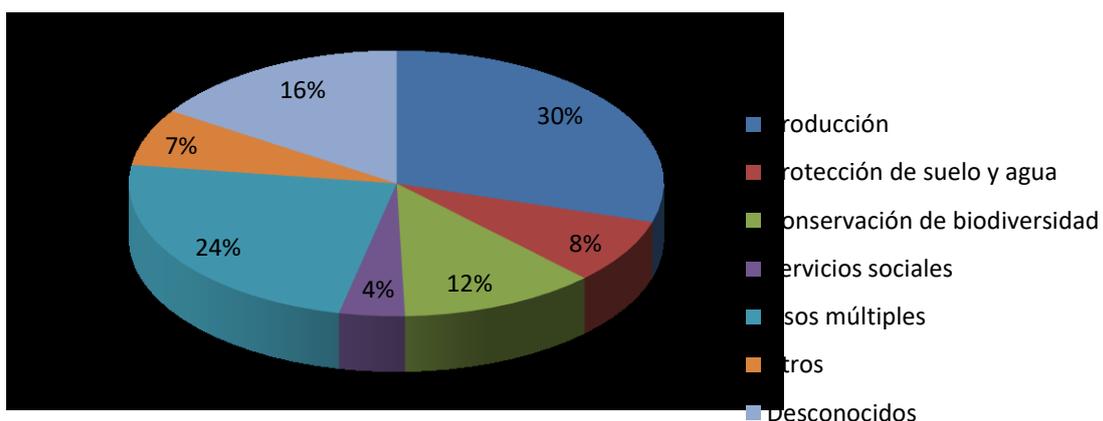


Figura 2. Funciones designadas de los bosques del mundo. Fuente: FRA (2010).

El 12% de los bosques están destinados a la conservación de la diversidad biológica. Se entiende biodiversidad biológica como “la variabilidad entre organismos vivos de todas clases, incluyendo, entre otros, los terrestres, marinos y de otros ecosistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los que forman parte; ello incluye la diversidad dentro de cada especie, entre especies y de ecosistemas”. Esto permite la adaptación y evolución de diferentes especies a los cambios que puedan producirse en el medio. Por lo que hay que tener en cuenta esa biodiversidad a la hora de una ordenación forestal, para que esta sea sostenible. Tan solo un 8% bosques es el que se dedica tanto a la protección del suelo como de sus recursos hídricos, siendo uno de los papeles principales de protección del ecosistema forestal ya que de estos dependen la conservación del agua, el aumento de su infiltración, la disminución de la escorrentía y la protección frente cualquier tipo de erosión. El 4% de los bosques del mundo se destinan a la prestación de servicios sociales como son los fines recreativos, de turismo, educación o conservación del patrimonio cultural. Este porcentaje sigue en aumento en los países desarrollados. Según el informe del perfil ambiental de España de 2013, el país cuenta con alrededor de un 55% de superficie de monte, unos 27,7 millones de hectáreas de las cuáles unos 18 millones son montes.

Según la FAO el total de emisiones de carbono de los bosques disminuyó más de un 25% entre 2001 y 2015, por la disminución de las tasas de deforestación mundiales. Estas tasas bajaron de 3,9 gigatoneladas de CO₂ al año a 2,9.

1.6. Importancia del carbono en el suelo

La acumulación del carbono a lo largo del tiempo y el confinamiento de los movimientos geológicos, ha dado lugar a la llegada de este hasta el mantillo más profundo. Los suelos tienen un importante papel en el ciclo global del carbono (C) en la naturaleza (Crichton 2012; Gougoulías y col., 2013; Schlesinger and Bernhardt, 2013). El suelo contiene hasta tres veces más carbono que la atmósfera y hasta cuatro veces más que la vegetación, como se puede observar en la Figura 3.

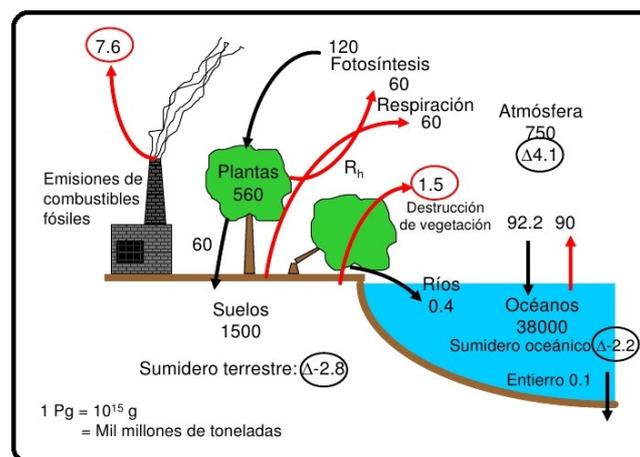


Figura 3. Ciclo global actual del carbono. Fuente: modificado de Schlesinger (1991).

El carbono orgánico del suelo es un parámetro importante en la determinación de la calidad del mismo (Doran y col., 1998; Singer y Ewing, 2000), ya que de este dependen la porosidad y capacidad de retención de agua, la biodiversidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes, etc.

La mitad del CO_2 que la vegetación capta de la atmósfera a través de la fotosíntesis es depositado en el suelo, donde se acumula en forma de materia orgánica y es devuelto a la atmósfera en forma de CO_2 a través de procesos de mineralización y descomposición (Figura 4). El CO_2 atmosférico que es captado por las plantas, mediante la fotosíntesis, es transformado e incorporado a sus estructuras y posteriormente es devuelto al suelo, con la caída de las hojas, ramas o muerte de la planta, en forma de materia orgánica. Por otra parte, los organismos heterótrofos intervienen en este ciclo de distintas formas: expulsando CO_2 a la atmósfera mediante la respiración, incorporando el carbono a su organismo mediante cadena trófica y aportándolo de nuevo al suelo mediante defecación o cuando mueren por su propia descomposición.

Una vez la materia orgánica llega al suelo en forma de restos animales y vegetales los microorganismos descomponedores se encargan de la mineralización y descomposición de los restos. La transformación de esta materia orgánica se realiza mediante hidrólisis, oxidación-reducción, condensación y polimerización, generación de radicales libres o fototransformación.

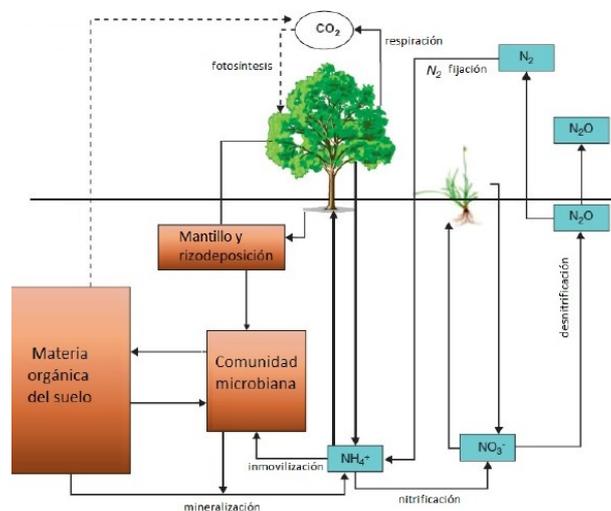


Figura 4. Ciclo del Carbono y Nitrógeno con los principales procesos mediados por los microorganismos. Fuente: modificado de Macdonald y col. (2011).

El carbono presente en el suelo forestal es de gran importancia, pues de él depende la propia continuidad del ciclo, así como la productividad de la masa. En este estudio se ha medido el carbono orgánico soluble (lábil) de cada uno de los puntos de muestreo.

1.7. Importancia del nitrógeno en el suelo

El nitrógeno es un constituyente esencial de las proteínas, clorofila, etc. Se trata, probablemente, del elemento que más limita el crecimiento de las plantas. En la atmósfera el nitrógeno se encuentra en forma de N_2 , pero el N_2 como tal solo puede ser utilizado por bacterias y algas cianofíceas, las cuales se encargan de fijar el nitrógeno al convertirlo en nitratos y amonio.

El nitrógeno se encuentra mayoritariamente en forma de materia orgánica (95%) y se puede encontrar como NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , N_2O y NO de forma inorgánica. Los iones NO_3^- y NO_2^- se encuentran prácticamente como iones libres en la disolución del suelo, mientras que la forma mayoritaria de encontrarlo es como NH_4^+ . En esta forma apenas se encuentra en la disolución del suelo ya que se nitrifica con gran rapidez.

Las entradas y salidas de nitrógeno en los suelos consisten en un conjunto de reducciones y oxidaciones sucesivas, para así hacer que el nitrógeno esté presente en formas accesibles para el metabolismo de animales, plantas y microorganismos.

El nitrógeno disponible para las plantas depende del equilibrio existente entre la conversión de nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral, lo que se conoce como mineralización, y la inmovilización, que consiste en la conversión de nitrógeno mineral en orgánico. La mineralización depende de muchos factores como serían la humedad del suelo, temperatura, textura, estructura, humedad, etc.

El nitrógeno atmosférico forma a pasar parte del suelo de dos formas distintas, por la oxidación del nitrógeno y deposición posterior a través de las precipitaciones (lluvia y nieve), la otra forma consiste en la fijación biológica del nitrógeno por la acción de microorganismos, principales responsables del mantenimiento del nitrógeno en el suelo. Esta segunda es la vía mayoritaria y consiste en los procesos de transformación de la materia orgánica presente en el suelo (microorganismos muertos y restos de plantas) en compuestos simples como aminoácidos, sales amónicas y nitratos.

La Figura 5 recoge el ciclo del nitrógeno en el suelo en ecosistemas forestales.

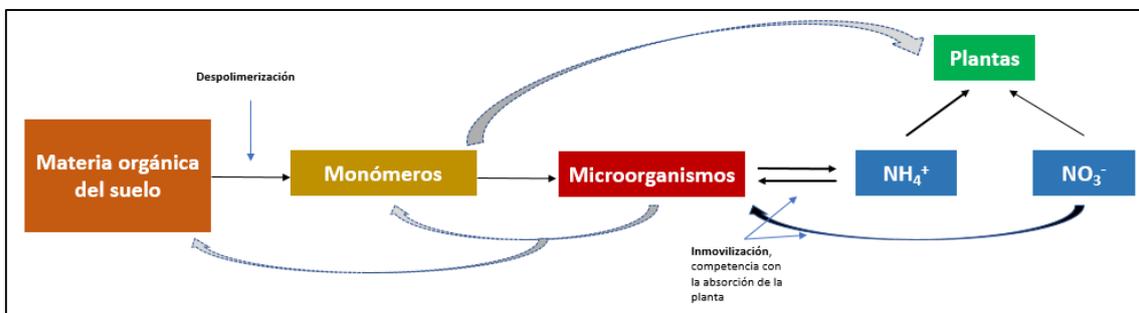


Figura 5. Ciclo del nitrógeno en el suelo en ecosistemas forestales. Fuente: modificado de Schimel y Bennet (2004).

La nitrificación es un proceso microbiológico que transforma el nitrógeno amoniacal en formas oxidadas de nitrógeno. Se trata de la oxidación del amonio a nitrito y la oxidación del nitrito a

nitrato. De este proceso depende la productividad del suelo y se produce gracias a dos géneros bacterianos como son los Nitrosomas y Nitrobacter. Según Kotlar y col. (1996) las reacciones que definen este proceso serían:

Nitrosomas: $2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ + \text{Energía}$

Nitrobacter: $2\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_3^- + \text{Energía}$

El amonio se trata de un compuesto poco móvil, por lo que su paso a nitrito, compuesto muy móvil, produce el escape de nitrógeno de numerosas formas intermedias como NO_3^- , N_2O^- , NO_x , N_2O , N_2 . Como se puede observar la mayoría de sus formas están oxigenadas, por lo que se deduce que este proceso se dará mayoritariamente en suelos con una gran aireación. Pero esta nitrificación puede verse afectada por diferentes procesos:

- La relación carbono/nitrógeno (C/N) y la cantidad de ion amonio: este ion es el sustrato para bacterias nitrificantes, por lo tanto, es esencial para la nitrificación. Por otro lado, si la relación C/N es muy alta, el amoniaco liberado de la materia orgánica será usado por los microorganismos para multiplicarse.
- La reacción del suelo: durante la reacción de amonio a nitrito se liberan iones de hidrogeno, lo cual acidifica el suelo. La nitrificación tiene lugar en pH entre 5,5 y 8, siendo óptima entre 6,9 y 7,5. Cabe destacar que las bacterias nitrificantes necesitan aportes de calcio, fosforo, cobre y magnesio, así pues, concentraciones elevadas de algunos oligoelementos pueden paralizar su actividad (Navarro,2003). La alcalinidad del suelo favorece la acumulación de nitrito, en los lugares donde se dan altas concentraciones de NH_3 y altos valores de pH, el nitrito tiende a acumularse, ya que su oxidación está inhibida (Van Cleemput y Samater, 1996).
- La aireación del suelo: numerosos estudios han demostrado que con un 20% de oxígeno en el aire se produce la máxima nitrificación, ya que las bacterias nitrificantes necesitan de oxígeno molecular para producir nitratos.
- Humedad del suelo: dependiendo del suelo se necesita una humedad determinada, por encima y por debajo de la cual se dificulta la producción de nitratos.
- Temperatura: Puede variar según regiones, bien por adaptación o por selección de los microorganismos. La temperatura óptima estaría entre 27 y 30°C, pero el proceso puede empezar a producirse a partir de 1,5°C.

En este proceso también se producen pérdidas de nitrógeno, principalmente en la fase soluble por lixiviación, por la asimilación de nitratos por las plantas, la fijación de amonio por arcillas, o desnitrificación en condiciones anaeróbicas. Haciendo referencia a la lixiviación de nitratos, es necesario saber que el nitrógeno nítrico es muy soluble en agua, a la vez que no es retenido por los coloides del suelo debido a su carga negativa, por lo que desciende arrastrado por la solución del suelo. La velocidad a la que este lixivía depende de la textura del suelo, así como de las precipitaciones de la zona. Este proceso hay que tenerlo muy en consideración en la zona mediterránea, sobretudo en la época de otoño-invierno, ya que las precipitaciones son muy variables y es en este

periodo cuando el movimiento de agua es descendiente y las raíces están menos activas. Cabe destacar que un suelo descubierto siempre tenderá una mayor lixiviación que un suelo cubierto, al igual que este nitrógeno nítrico puede ascender por capilaridad en períodos de sequía.

En este proyecto se ha medido el nitrógeno inorgánico del suelo (NH_4^+ , NO_3^-) en dos períodos diferentes de tiempo, y se ha estudiado la mineralización y la nitrificación mediante el uso de resinas de intercambio catiónico in situ. Estas resinas tienen la habilidad de adsorber y retener iones de manera similar a las superficies de los coloides de las partículas del suelo.

Uno de los métodos establecidos para la realización de este estudio consiste en la recogida de las muestras y la extracción del nitrógeno intercambiable con una disolución concentrada de cloruro potásico (KCL) para así establecer el nivel inicial de NO_3^- y NH_4^+ . Posteriormente se aplica la misma técnica, pero con las muestras extraídas en los diferentes periodos de tiempo, de forma que la diferencia entre ambas permite conocer la cantidad de nitrógeno mineralizado.

Como se ha dicho anteriormente las resinas actúan como los coloides del suelo, y aunque en un principio eran utilizadas para determinar la extracción de fósforo disponible, en 1986 Binkley y otros investigadores utilizaron bolsas de nailon, las cuales contenían resina, en condiciones de campo en varios ecosistemas para detectar aquellos nutrientes que consideraban de interés. Fue ese mismo año cuando DiStefano y Gholz (1986) empezaron a usar tubos abiertos con bolsas de resinas en la parte inferior, así se mantienen las condiciones aeróbicas dejando paso al agua y la captación del nitrógeno lixiviado.

En este proyecto se han usado resinas cargadas con K^+ y Cl^- . Estos iones producen intercambios con iones de similar carga, como serían el NH_4^+ y NO_3^- . Según Skogley y Dobermann (1996) los iones se transfieren directamente de la solución salina del suelo a la superficie de las resinas por procesos de difusión, por tanto, la presencia de agua es un factor crítico para que se de esta transferencia.

En este proyecto se ha usado resinas catiónicas y aniónicas mezcladas, y los tubos se han ido sustituyendo en periodos de 2 meses.

1.8. Cambio climático y ecosistemas forestales

El cambio climático constituye a día de hoy un tema de primera magnitud tanto en la opinión pública como en la agenda política, además ha sido planteado como uno de los temas más importantes del siglo XXI. Considerando el cambio climático como la variación del clima global del planeta Tierra debido a la acción del ser humano. Aunque un cambio climático también puede darse por causas naturales como erupciones volcánicas, desplazamiento de las placas tectónicas o modificaciones de la radiación solar, son muchos los estudios que demuestran que la acción humana es la principal causante de estos cambios en los últimos años. El aumento de dióxido de carbono

producido por la combustión del carbón, petróleo y gas sumado a la tala y sobreexplotación son una de las principales causas de este cambio.

En el año 2001 el Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) se mostraba un claro aumento de las temperaturas, lo cual estaba afectando a los diferentes ecosistemas del globo terráqueo. Se estima que la temperatura media global se ha visto aumentada en aproximadamente 0,8°C en el siglo XX, mientras que el nivel del mar ha crecido de 10 a 12 cm, debido al deshielo de los polos.

Con la acumulación de pruebas de que las concentraciones de gases de efecto invernadero están calentando el clima del mundo, la investigación se ha centrado cada vez más en la estimación de los impactos que puedan producirse en diferentes escenarios de calentamiento. Particular atención se centra en los cambios en la productividad de los bosques como resultado del cambio climático (Boisvenue y funcionando, 2006; Caso y Peterson, 2007; IPCC, 2007; IPCC-GTEIC de 2007). Esta atención se debe a la preocupación por la productividad de los bosques en el futuro, ya que esta está directamente influida por los cambios en los regímenes de temperatura y precipitación. Por otra parte, la explotación de bosques también se ve afectada por este cambio, así como los diferentes hábitats que posibilitan la vida silvestre y garantizan la supervivencia de diversas especies.

En 1997 el protocolo de Kyoto reconoce que los bosques eran una importante herramienta de captación de carbono para compensar el aumento de CO₂ producido por las emisiones de este a la atmosfera. Como resultado de esta función, los bosques están siendo incluidos en una gran variedad de legislación. Esto se debe a que se estima que la productividad potencial forestal, que depende de la composición de la vegetación, suelos, clima, y los regímenes de perturbaciones naturales y antropogénicas puede llegar a cambiar debido a este fenómeno.

Los bosques son particularmente sensibles al cambio climático, debido a la larga vida útil de los árboles no permite una rápida adaptación a los cambios ambientales. Asociados con el cambio climático, hay varios factores que afectan a los ecosistemas forestales. El aumento de la temperatura produce que la disponibilidad de agua disminuya debido a un aumento en la transpiración causado por el aumento previsto de la temperatura. En respuesta a la limitación de la humedad, la adaptación natural incluye la reducción de la producción de biomasa y la partición efectiva de compuestos fotosintéticos de diferentes componentes arbóreos (Kramer y Kozlowski, 1979). El aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera produce un aumento en las tasas de fotosíntesis, pero este aumento a su vez variará con la cantidad de nitrógeno y la diversidad de especies vegetales (Saxe y col., 1998; Norby y col., 1999; Ainsworth y Long, 2005).

Se encuentran cambios químicos a nivel troposférico, así como a nivel del suelo, que pueden afectar a la masa vegetal. El aumento del ozono troposférico produce un aumento del estrés en las diferentes especies que forman parte de las masas forestales.

A su vez la de posición de nitrógeno en la atmosfera dificulta el crecimiento de los bosques, todo esto sumado implica un bajo crecimiento de la masa forestal. En combinación con los aumentos de temperatura que esto puede conducir a más sequías y afectar claramente a los procesos fotosintéticos y a la fotorrespiración, especialmente en la zona mediterránea y templada Continental, por lo que la masa forestal se puede ver altamente afectada por este fenómeno.

A su vez, la dinámica de población se puede ver afectada, ya que estos cambios favorecen la aparición de organismos exotérmicos, tales como insectos herbívoros, así como la aparición de enfermedades fúngicas. Estos factores afectarán a los bosques europeos, sin embargo, la gravedad de los impactos sobre los bienes y servicios forestales dependerá de la situación regional y los cambios específicos en el clima. La vulnerabilidad al cambio climático depende también de la capacidad de los ecosistemas naturales y la sociedad para hacer frente a los impactos (Schröter y col., 2005).

1.9. Tratamiento silvícola

Actualmente la silvicultura, junto con el resto de políticas forestales, debe garantizar una gestión ecológicamente sostenible de las masas forestales, ya que, estos ecosistemas se encargan de proporcionar al hombre unos servicios indispensables para garantizar su supervivencia (Castillo y col., 2003).

Desde hace muchos años el ser humano ha producido cambio en los bosques, evolucionando ambos al mismo tiempo. El hombre se ha encargado de la introducción de especies que le resultasen útiles o especies por cuyo valor paisajístico les interesaba más tener en un ecosistema, se ha encargado de hacer selección de individuos de una misma especie según su interés, ha incendiado bosques para favorecer las condiciones de caza, así como para la obtención de zonas de cultivo, o incluso por motivos políticos ha ido manejando a su interés las masas forestales. La falta de desarrollo en gran parte de la población mundial ha producido una mala gestión a la hora de explotar los recursos forestales. El ser humano ha hecho uso de estos recursos para su propio desarrollo y su necesidad para sobrevivir, pero estos recursos son limitados y una mala gestión puede hacer que estos se agoten. Para evitar que esto ocurra es necesario el uso de prácticas sostenibles.

Se podría definir selvicultura como “el modo de aplicar el conocimiento de la estructura, crecimiento, reproducción y formas de agrupación de los vegetales que pueblan los montes, de forma que se obtenga de ellos una producción continua de bienes y servicios necesarios para la sociedad” (Serrada, 2008a).

En 1996 tuvo lugar en España y Portugal la reunión del grupo Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal (IUFRO), en la cual se definió la silvicultura de la siguiente forma: “La selvicultura es una ciencia aplicada que rige el manejo económicamente sostenible de los ecosistemas forestales para la satisfacción de las demandas de la sociedad (bienes y servicios). Para conseguir estos objetivos, la selvicultura diseña tratamientos ecológicamente sostenibles, abiertos al ejercicio de

otras opciones por las generaciones venideras. La Selvicultura integra teorías, principios y métodos biológicos y ecológicos inferidos de los bosques, ya sean estos espontáneos o artificiales, así como ciertas teorías y planteamientos económicos.”

La selvicultura se aplica en las zonas de pino carrasco por cuatro razones fundamentales:

- Prevención de incendios forestales: Los incendios son muy comunes en la zona mediterránea debido al clima, pues esta zona se caracteriza por tener periodos de grandes sequías, lo cual junto con los modelos de combustible y la topografía facilitan la existencia de incendios con una gran magnitud superficial. En estos casos cada tratamiento es diferente según las características de la masa forestal, pero en todos los tratamientos se busca el mismo objetivo: una modificación de la masa forestal que dificulte la propagación del fuego, así como una diversificación de las masas respetando el hábitat de la vida silvestre y el paisaje.
- Mejora evolutiva: Siempre que la masa forestal lo permita, una diversificación de las especies y estructuras pueden favorecer la evolución de un ecosistema hacia especies principales de mayor rango, mejorando así la estabilidad y elasticidad del ecosistema (Otto, 1993).
- Mejora paisajística: este objetivo implica la realización de actuaciones que, la mayoría de veces, alejan a la masa forestal de su estado natural ya que se produce una selección de pies de buenos fustes, individuos sin plagas ni enfermedades, sin combustibles muertos, etc.
- Protección del suelo: Las actuaciones anteriores pueden comprenderse desde el punto de vista de la conservación de suelos, garantizando así la prevención de suelos y la mejora de la cubierta vegetal.
- Producción de madera: En las zonas de menor pendiente los pinos adultos pueden llegar a tener como objetivo la producción de madera, aunque como papel secundario.

Es por esto que la selvicultura llevada a cabo en los montes mediterráneos es en gran parte preventiva. Lo que se pretende es limpiar y romper la continuidad de la masa forestal como combustible, para así dificultar la propagación del fuego y evitar que afecte a todos los estratos de vegetación. Otro motivo del uso de tratamientos silvícolas es la prevención de plagas y la prevención frente factores abióticos, para así favorecer a los individuos presentes y asegurar su supervivencia. De esta forma, al eliminar la competencia se permite a los individuos que crezcan mejor y más sanos.

Varios estudios han demostrado que los tratamientos silvícolas realizados para la regeneración de masas de pino carrasco post-incendio, mejoran el crecimiento de los pinos, así como sus parámetros reproductivos (Verkaik y Espelta, 2006).

La verdadera respuesta a estos cambios viene dada después de largos periodos de tiempo, ya que el objetivo es una evolución favorable de la masa forestal con las mínimas intervenciones posibles. Los estudios de esta evolución suelen realizarse en un periodo de uno o dos años desde la realización del tratamiento. Por otra parte, un ecosistema es un sistema en equilibrio, el cual después de una modificación tiende a

buscar y restablecer un nuevo equilibrio, por lo que a corto plazo se puede apreciar cómo afectan los cambios producidos al ecosistema.

Todo esto hay que tenerlo en cuenta a la hora de elegir el tipo de intervención más adecuada para la masa forestal. Así pues, el tratamiento silvícola usado para este estudio es la creación de claras. Estos tratamientos eliminan biomasa, sobretodo de las copas o incluso pies enteros. Este tratamiento puede tener sus ventajas como ya se ha dicho anteriormente, mejor crecimiento de individuos, individuos más sanos y resistentes, etc. Pero a su vez, este tratamiento también puede presentar desventajas debido a las características climáticas de la zona mediterránea. Como se ha explicado anteriormente el clima mediterráneo se caracteriza por periodos de sequias en la época estival, por lo que estos tratamientos pueden suponer la pérdida de agua del suelo por evaporación directa. Al abrirse claras la radiación solar que llega al suelo es mayor por lo que se produce un aumento en la evapotranspiración. Por otra parte, este aumento de radiación solar incidiendo directamente en el horizonte orgánico puede producir un aumento de la mineralización y nitrificación del suelo. A su vez, al disminuir la vegetación también lo hace su capacidad de intercepción de agua, por lo que la cantidad y la fuerza del agua que llega al suelo será mayor, favoreciendo la erosión y compactación del mismo. A su vez, la compactación dificulta la infiltración lo cual favorecerá las escorrentías superficiales.

1.9.1. Las claras

Las claras con cortas hechas en una masa arbórea con la finalidad de controlar la densidad de la masa en todas las etapas de su desarrollo, así mejorar su producción y la calidad de la masa que queda en pie. Lo que se pretende es la extracción del excedente para llegar a una espesura óptima de la masa forestal.

El clareo se realiza en las masas inmaduras y su finalidad es la de regular la distribución del espacio de crecimiento para así favorecer la masa forestal existente y aumentar la producción de material utilizable (Hawley y Smith, 1982).

Lo que se pretende con esta técnica es reducir la densidad de la masa forestal y reducir la competencia entre individuos. La respuesta del ecosistema a estos cambios depende de factores como la localización, la especie, la edad de los individuos y la clase de copa. Al reducir la cantidad de árboles presentes se permite una mayor disponibilidad de luz, agua y nutrientes.

Gracias a los cambios producidos por las claras los árboles aumentan de diámetro más rápidamente, muestran mayor resistencia a plagas y se vuelven más productivos, es decir generan más frutos y semillas. También se ha observado una mayor tasa fotosintética, aumento del área foliar y un aumento en la concentración de nitrógeno y fósforo en las hojas (Castillo y col., 2003).

Existen diferentes tipos de claras pues dependiendo de los objetivos del plan de manejo, ya que es necesario determinar los pies que serán eliminados y aquellos que se verán favorecidos.

- Clara baja: En este tipo de clara se extraen los árboles dominados, dañados, comprimidos, muertos o moribundos de la masa forestal.

Según la severidad de las claras se pueden distinguir 3 tipos:

- Ligera: se trata de una clara baja que afecta a los pies muertos y ahogados
 - Media: en este tipo se eliminan aquellos árboles muertos, ahogados y dominados.
 - Intensa: afecta a los árboles anteriores, pero también se eliminan los árboles codominantes de escasa calidad.
- Claras altas: se extraen aquellos árboles codominantes y dominantes presentes en la masa forestal y se dejan los codominantes más prometedores.
 - Claras mixtas: intermedias entre las dos anteriores, se extraen los árboles dominados y comprimidos, así como una proporción de dominantes y codominantes ahorquillados, ramosos, torcidos, etc.
 - Claras sistemáticas: los árboles se extraen según un criterio previamente fijado. Por ejemplo, un árbol sí y uno no. Casi siempre se usa este tipo de claras en repoblaciones lineales.
 - Claras selectivas: En rigor toda clara no sistemática es selectiva, estas claras se dan cuando las cortas afectan a los árboles con mejores características.
 - Claras con selección de árboles de porvenir: se trata de elegir un número reducido de árboles para que permanezcan hasta el final. Se elegirán estos árboles teniendo en cuenta una característica considerada interesante para su futuro aprovechamiento.

En este estudio se eligió una clara baja intensa para la realización del tratamiento. Se eliminaron los pies del estrato dominado y hundido, así como árboles con la clase de copa más alta hasta conseguir la densidad deseada. Este tratamiento se dio sobre una masa forestal monoespecífica de *Pinus halepensis* de alta densidad. Esta masa forestal provenía de una regeneración post-incendio y se eliminó entre un 85-90% de los pies. Aunque si tenemos en cuenta el área basimétrica (suma, expresada en $m^2 ha^{-1}$, de las secciones normales (1,3m) de todos los árboles existentes en una hectárea de una masa), se eliminó el 50% de la masa vegetal.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es analizar el efecto de un tratamiento selvícola a corto plazo sobre una parcela de *P. halepensis*, situada en el monte de la Calderona. Se realizó un clareo en una parcela para poder realizar una comparación con otra parcela no tratada. Debido a que los parámetros a analizar varían estacionalmente se han realizado dos muestreos, uno en septiembre y otro en diciembre.

Los objetivos secundarios de este proyecto serían:

- Medida del carbono orgánico soluble en el horizonte orgánico y mineral superficial del suelo. Este carbono es el más disponible para la biota del suelo. Este es utilizado por los microorganismos encargados de la descomposición de materia orgánica para la obtención de energía.
- Medida del carbono de la biomasa microbiana y de la respiración basal. Este carbono engloba al conjunto de microorganismos presentes en el ecosistema del suelo, que están involucrados en la descomposición de la materia orgánica y en el cierre de los ciclos de nutrientes. Es un indicador sensible a cambios producidos en el suelo debido a variaciones ambientales. Por otra parte, la respiración refleja la actividad biológica del suelo ya que la actividad metabólica de los microorganismos del suelo puede ser medida mediante el desprendimiento de CO₂ o el consumo de oxígeno. La respiración indica la población microbiana viva mientras que el CBM engloba tanto organismos vivos como muertos.
- Estudio de la dinámica del nitrógeno inorgánico en el suelo. La transformación de N orgánico a formas minerales disponibles para las plantas (mineralización) es un indicador de la calidad del suelo.

Este Trabajo Final de Carrera se enmarca en un proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D que lleva por título “Desarrollo de conceptos y criterios para una gestión forestal de base ecohidrológica como medida de adaptación al cambio global (SILWAMED)”, ref. CGL2014-58127-C3-2-R-AR. Este proyecto es llevado a cabo por investigadores del Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Forestal del Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y medio Ambiente perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio: localización y caracterización

El área de estudio forma parte del paraje de la Sierra de la Calderona, la cual se encuentra entre la provincia de Castellón y la provincia de Valencia (Figura 6). La sierra de la Calderona abarca casi 60.000 has quedando definida por las cuencas de los ríos Palancia y Turia. Debido a su gran interés ecológico y paisajístico es considerado uno de los territorios naturales más valiosos de la Comunidad Valenciana, además de considerarse el principal pulmón verde de Valencia debido a su proximidad a esta.

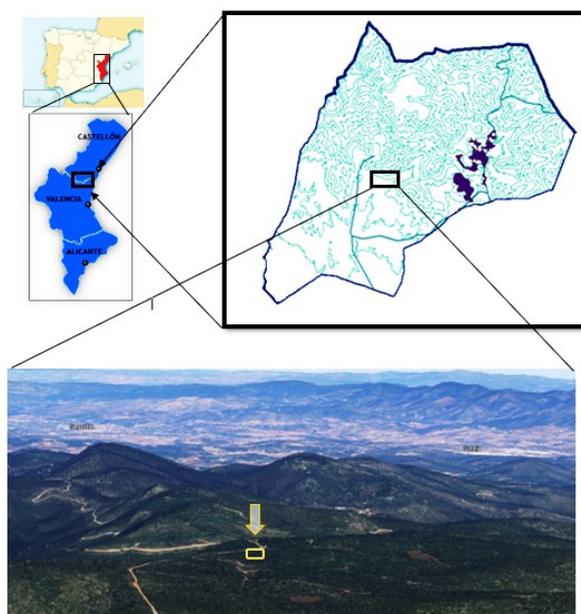


Figura 6. Localización de la zona de estudio.

3.1.1. Geología y geomorfología

Cabe destacar el núcleo triásico oriental como uno de los rasgos orográficos más importantes de la zona, en el cual se puede encontrar la presencia de muelas calizas como Mola Segart, Xocainet o la Redona, así como un predominio a lo largo de todo el territorio de material silíceo, en el cual se pueden encontrar espectaculares crestas de areniscas rojas (Gorgo, Garbí, Picayo) las cuales envuelven núcleos carbonatados como Rebalsadors, Alt del Pí, Oronet y Peñas blancas. Por otra parte, haciendo referencia al núcleo jurásico occidental, punto de entronque con las estribaciones ibéricas, cuenta con la elevación principal del ámbito del Plan (Montemayor).

Asimismo, la Sierra de la Calderona se encuentra por debajo de los 1000 m de altura, excepto el pico Montemayor donde llega a alcanzar una cota de 1015 m. Otras alturas importantes a tener en cuenta serían el Gorgo (907 m), Oronet (742 m) y el Garbí (600m).

Los materiales geológicos dominantes en la sierra corresponden al Mesozóico, más concretamente al Triásico medio. En esta etapa los materiales se ven representados mayoritariamente por depósitos marinos carbonatados formados sobre la plataforma continental en condiciones de calma y poca profundidad. Estos aparecen sobre la serie detrítica del Buntsandstein, y resultan de una transgresión marina, la cual ha ido evolucionando progresivamente hacia condiciones de confinamiento.

3.1.2. Climatología

Teniendo en cuenta la localización de la Sierra de la Calderona el clima predominante es el mediterráneo. Este se caracteriza por una oscilación moderada de las temperaturas, las cuales oscilan a lo largo del año entre los 16 y 17.5 °C. Otra de las características de este clima viene dado por la irregularidad de sus precipitaciones, cuyos valores anuales oscilan entre los 350 mm y los 600 mm, así como máximos otoñales que en algunos casos pueden llegar a tener carácter torrencial.

En la Figura 7 se puede observar el diagrama ombrotérmico de la estación más cercana a la zona de estudio, la cual se encuentra en Segorbe. En este diagrama se observa claramente la acusada sequía estival, así como un acusado pico de precipitaciones correspondiente a la época otoñal. En las zonas montañosas pueden llegar a darse características intrazonales de mayor humedad, de ahí la importancia de las precipitaciones horizontales.

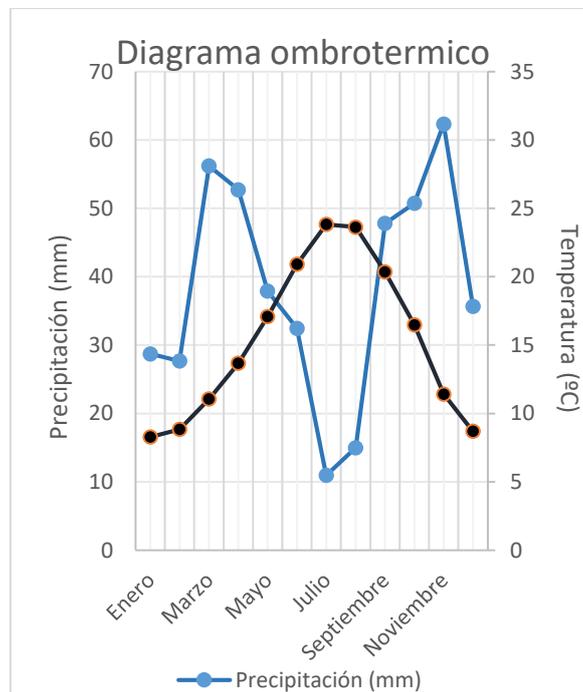


Figura 7. Diagrama ombrotérmico. Fuente: elaboración propia.

Durante el periodo de estudio de las parcelas la climatología fue bastante irregular, pasando de un clima soleado y caluroso a un largo periodo de lluvias de hasta 140mm. En la Figura 8, los datos de la cual los hemos obtenido de la estación meteorológica de

Segorbe, podemos observar la diferencia tan considerable tanto de temperatura como de precipitaciones del mes de noviembre y diciembre.

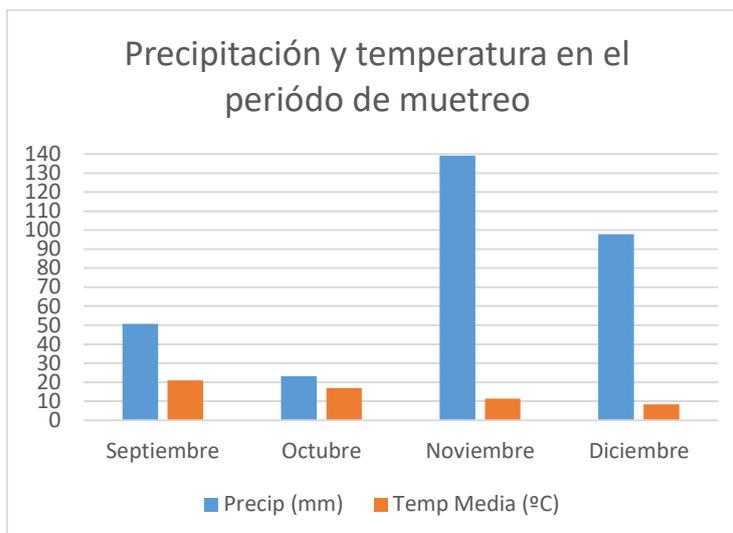


Figura 8. Diagrama precipitación y temperatura en el periodo de muestreo.

En la siguiente tabla podemos observar la clasificación del clima a través de varios índices climáticos, así como la clasificación bioclimática según la UNESCO-FAO:

Tabla 1. Clasificación bioclimática de la zona de estudio.

Índice de Lang	Zona árida
Índice de Martonne	Estepa y países secos mediterráneos
Índice de Dantin - Revenga	Zona árida
Clasificación bioclimática según UNESCO - FAO	
Clima Templado	
Invierno Frío	

3.1.3. Hidrografía

El río *Palancia* y el barranco *Carraixy col* norte y el río *Turia* al sur, son las tres cuencas principales de la red hidrográfica correspondiente a la zona de estudio. Se puede destacar en la vertiente norte los barrancos de *La Torrecilla*, *Agua Amarga* y *Saberola*, entre otros. En lo referente a la vertiente sur se destacan la rambla de *Escorihuela*, que desemboca en el *Turia*, y en la mitad central se sitúan un conjunto de barrancos.

3.1.4. Flora

La vegetación de la zona de estudio es muy diversa, puesto que presenta una orografía muy abrupta por sus desniveles, así como por la presencia de materiales tanto carbonatados como silíceos. Debido a la actividad humana (agricultura, pastoreo, desarrollo urbanístico en medio rural, aprovechamiento forestal, etc) y a los incendios forestales la vegetación climática se ha visto desplazada a barrancos y zonas poco

accesibles, lo que ha facilitado el dominio de pinares, matorrales y herbazales. En la zona boscosa del área de estudio predomina el pino carrasco acompañado por matorral (*Cistus salvifolius*, *Cistus. Monspeliensis*, *Rosmarinus officinalis*, *Ulex parviflorus* y *Erica multiflora*), mientras que en suelos descarbonatados predomina el pino rodeno junto con especies silicícolas de matorral. El bosque carrasco es muy escaso y se presenta bastante fragmentado en el área de estudio. En el estrato inferior se encuentra madreSelva (*Lonicera implexa*), zarzaparrilla (*Smilax aspera*), palmito (*Chamaerops humilis*) y aladierno (*Rhamnus alaterus*), entre otros, pudiendo apreciar la diferencia entre carrascal silicícola y calcícola por las especies de matorral que presentan, como serían en el primer caso brezos, jaras y salvias, mientras que en el segundo caso serían la coscoja, el lentisco o el romero.

Actualmente la zona se halla dominada por especies de matorrales como el romero, el brezo y la aliaga, arbolados de pinos, y pastizales vivales, siendo los de mayor cobertura: el espartal (*Heteropogono contorti - Stipa tenacissimae*), lastonar termófilo (*Teucrium pseudochamaeepytidis - Brachypodietum retusi*) y el lastonar continental (*Phlomidilychnitidis - Brachypodietum retusi*). Esta vegetación se debe a la degradación que sufre esta zona actualmente.

3.1.5 Fauna

El paisaje estático del relieve y la vegetación da lugar a una abundante fauna entomológica, pasando por el gallipato (*Pleurodeles waltl*) hasta aves como el chotacabras (*Caprimulgus europaeus*), el gavilán (*Accipiter nisus*), el azor (*Accipiter gentilis*) o el águila culebrera (*Circaetus gallicus*).

La fauna de la zona es muy diversa, presentando hasta 7 especies de anfibios y hasta 15 de reptiles, entre los cuales se puede destacar la presencia de Galápagos leproso (*Mauremys leprosa*), la salamanguera rosada (*Hemidactylus turcicus*), la cual está considerada de interés de especial protección y el lagarto ocelado (*Timon lepidus*). También podemos encontrar diferentes especies de serpientes como la culebra bastarda (*Malpolon monspessulanus*), la culebra viperina (*Natrix maura*) y la víbora hocicuda (*Vipera latasti*), entre otras.

La Sierra Calderona es un espacio considerado zona ZEPA, puesto pueden llegar a nidificar unas 70 especies de aves nidificantes, según censo SVO 1996. Las especies de rapaces más destacables son el águila culebrera (*Circaetus gallicus*), el águila perdicera (*Aquila fasciata*), el búho real (*Bubo bubo*), el mochuelo común (*Athene noctua*) y el ratonero común (*Buteo buteo*), entre otros. Otras especies de aves abundantes en la época reproductora y cuyo hábitat natural es el matorral, el cual se extiende por toda la sierra, son el abejaruco (*Merops apiaster*), currucas cabecinegras (*Sylvia melanocephala*) y currucas rabilargas (*Sylvia undata*).

Por otra parte, podemos encontrar mamíferos como el jabalí (*Sus scrofa*), el cual se puede encontrar en zonas con gran cubierta vegetal. En zonas de matorral o bosque mediterráneo sin mucha afluencia humana y con pedreras y valles con riachuelos, se

pueden encontrar especies como el gato montés (*Felis silvestris*), zorros (*Vulpes vulpes*) y ginetas (*Genetta genetta*). También es muy común encontrar ardillas (*Sciurus vulgaris*) tanto en los bosques de coníferas como de frondosas.

3.2. Diseño experimental

La zona de estudio se encuentra en 39° 42' N 0° 27' O, al norte de la ciudad de Valencia y en el término municipal de Serra. La zona sufrió una regeneración natural postincendio de pino carrasco (*P. halepensis*) lo que produjo una alta densidad de ejemplares y la necesidad de someter la zona a una clara en enero de 2013, en la cual se eliminó un 95% de los pies.

Se seleccionaron dos parcelas de estudio con una superficie de 1500 m² cada una, presentando la misma orientación y pendiente (30%). Ambas se encuentran a una altura de 791.60 m, pero mientras que una se encuentra sometida al tratamiento silvícola (clara) y la otra sin intervenir (control), en la cual queda la totalidad de la espesura inicial (Figura 9 y 10).



Parcela tratada

Parcela control

Figura 9. Parcela control y parcela tratada durante el tratamiento silvícola.



Figura 10. Vista aérea de las parcelas.

El muestreo se lleva a cabo con una periodicidad bimensual desde septiembre de 2016 (periodo a) a diciembre de 2016 (periodo b). Se muestrean 18 puntos en total, 9 en cada parcela, repartidos de manera homogénea según anchura y pendiente de la parcela (Figura 11).

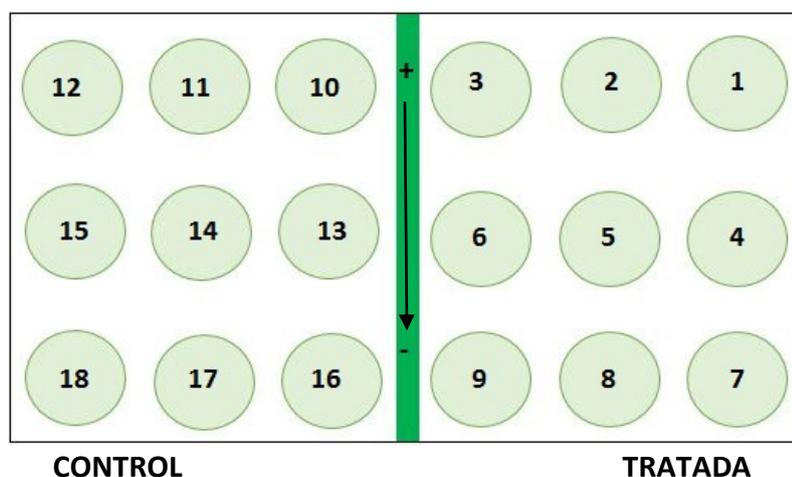


Figura 11. Puntos de muestreo.

Las muestras se obtienen de resinas de intercambio iónico, para estudiar la mineralización, la nitrificación y la lixiviación de nitrógeno, y de muestras de suelo superficial y mantillo a través de un tamiz de 2 mm para eliminar grava y restos orgánicos. Las muestras se guardaron en una nevera hasta la hora de realizar los análisis. La extracción de la materia orgánica soluble, el fósforo soluble y el nitrógeno inorgánico se realiza dos semanas después del muestreo.

3.3. Análisis del suelo

Los análisis realizados en el laboratorio quedan reflejados en la Tabla 2, según la muestra de suelo utilizada. Los resultados obtenidos son la media de dos réplicas del análisis de las muestras en todos los ensayos, así se reduce el error analítico.

Tabla 2. Análisis realizados.

Suelo mineral tamizado en fresco por 2mm	Suelo interior del tubo tamizado en fresco por 2mm	Resinas
<ul style="list-style-type: none"> - Humedad - Carbono orgánico soluble - Carbono de la biomasa microbiana - Respiración - Nitrógeno mineral (NO_3^- y NH_4^+) 	<ul style="list-style-type: none"> - Humedad - Nitrógeno mineral (NO_3^- y NH_4^+) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrógeno mineral (NO_3^- y NH_4^+)

3.3.1 Humedad del suelo. Factor humedad.

Se define humedad del suelo como la cantidad de agua que hay por unidad de masa de suelo seco. Este parámetro resulta muy útil a la hora de comparar muestras de suelo, puesto que una misma cantidad de suelo no pesará lo mismo si la cantidad de agua retenida es diferente.

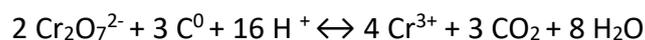
Los datos analíticos se expresan por unidad de peso de suelo seco. Con el factor de humedad podemos hallar la equivalencia correspondiente entre peso seco y peso húmedo.

Procedimiento: Se pesaron 25 g de suelo húmedo en cajas metálicas. Seguidamente se introdujeron las cajas abiertas en una estufa a 105 °C, hasta peso constante. Posteriormente se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente en un desecador y seguidamente se pesaron las cajas, obteniendo el peso seco del suelo.

$$f \text{ humedad} = \frac{\text{masa suelo seco}}{\text{masa suelo húmedo}} \quad \% \text{ de humedad} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} \times 100$$

3.3.2 Materia orgánica

Para la determinación de la materia orgánica se empleó el método de *Walkey-Black* (1934), el cual consiste en en la oxidación del carbono orgánico, que se encuentra inicialmente en su forma reducida CO, utilizando como oxidante el ion dicromato, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$. El carbono se encuentra en distintos niveles de oxidación dentro de la materia orgánica del suelo, pero este método asume que cada átomo de carbono es oxidado desde un estado de oxidación 0 a un nivel +4, por razones empíricas, reflejando de esta manera todo el intercambio de electrones en la reacción.



El carbono orgánico se calcula de forma indirecta, relacionándolo con el dicromato potásico ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) que queda tras producirse la reacción y que no ha reaccionado con el carbono.

Procedimiento: se pesaron 0,5 g de suelo seco en matraces de 250 mL. Seguidamente se añadieron 50 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N y se agitaron los matraces para dispersar el suelo en la solución. A continuación, se añadieron, en la campana de extracción de gases, 10 mL de H_2SO_4 concentrado y se mezclaron los componentes moviendo el matraz vigorosamente durante aproximadamente un minuto. Se dejó enfriar aproximadamente 30 mins y se le añadieron 25 mL de agua destilada y de nuevo se dejó enfriar 30 min. Se añadieron 8 gotas del indicador (complejo ferroso de ortofenantrolina) y se valoró el exceso de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N con sulfato ferroso 0,5 N. El punto final de la valoración se detectó por el viraje a color pardo de la solución. Se realizaron dos repeticiones por muestra y

dos blancos. La preparación del blanco se lleva a cabo sin añadir suelo a la preparación anteriormente descrita.

- **Carbono orgánico oxidable COO**

$$\% \text{ COO} = [(meq \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - meq \text{ FeSO}_4) / P_{ssa}] \times 0,003 \times 100$$

Donde,

$meq \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = V(\text{mL}) (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) \times N (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)$

$V(\text{mL}) (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 10 \text{ mL}$

$N (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 1 \text{ N}$

$meq \text{ FeSO}_4 = V (\text{mL}) (\text{FeSO}_4) \times N (\text{FeSO}_4)$

$V (\text{mL}) (\text{FeSO}_4) = V (\text{mL})$ de FeSO_4 utilizado en la valoración

$N (\text{FeSO}_4) = 0,5 \text{ N}$

P_{ssa} = peso (g) de la muestra de suelo

0,003 = peso equivalente del carbono

- **Carbono Orgánico Total (COT)**

$$\text{COT} = \% \text{ COO} \times 1,3$$

Donde,

1,3 = Factor de conversión a *COT*, ya que el método de Walkey-Black oxida el 77% del *COT*.

- **Materia Orgánica (MO)**

$$\% \text{ MO} = \% \text{ COO} \times 1,3 \times 2$$

Factor de transformación de Carbono Orgánico Total a Materia Orgánica: 2

Factor conversión *COT* (método de *Walkey-Black* oxida el 77% del *COT*): 1,3

3.3.3 Carbono orgánico soluble

Para determinar el carbono orgánico soluble se utilizará el método de Yakovchenko y Sikora (1998).

Procedimiento: se pesaron para cada muestra 10 gramos de suelo seco, en tubos de centrifuga de plástico. Se añadieron 25 mL de agua destilada en cada tubo. Se agitaron todas las muestras en un agitador de brazos durante 30 minutos. Se centrifugaron durante 10 minutos, a 2500 r.p.m. y se filtraron con papel Whatman nº42. Para la detección por reacción colorimétrica se pipetearon 2 ml del extracto (filtrado) en tubos de ensayo y se añadieron 3 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,20 N en H_2SO_4 26,7 N. Seguidamente, se agitaron 15 segundos utilizando un vortex. Se taparon los tubos de ensayo con papel de aluminio y se pusieron en estufa a 140°C durante 20 minutos. Tras dejar enfriar se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 590 nm. El autocero se realizó con el patrón 0.

Se realizaron 2 repeticiones por muestra. Para el blanco se siguió el mismo procedimiento que para las muestras, pero sin suelo. Se prepararon dos blancos.

3.3.4 Carbono de la biomasa microbiana

Para determinar la biomasa microbiana se utilizará el método de fumigación-extracción (Vance y col., (1987) modificado por Wu y col., (1990)). Mientras que para la determinación del carbono orgánico se utilizará el método Yakovchenko y Sikora (1998).

Se realiza la fumigación para que las células intactas de los microorganismos se rompan liberando así los compuestos orgánicos, sin afectar de manera significativa a la materia orgánica inerte presente en el suelo. Se obtendrá el carbono orgánico debido a la biomasa microbiana mediante la diferencia entre las muestras fumigadas, de las cuales se conocerá el contenido de carbono orgánico del suelo más el de los microorganismos, y de muestras no fumigadas, de las cuales se obtendrá el carbono orgánico debido a la biomasa microbiana.

El carbono orgánico es extrae tanto en las muestras fumigadas como en las no fumigadas utilizando sulfato potásico 0,5 M.

Procedimiento: Se pesó el suelo húmedo tamizado a través de 2 mm correspondiente a 5 g de suelo seco (4 réplicas por muestra dos fumigadas y dos no). Las muestras a fumigar se colocaron en un desecador en cuyo fondo se encontraba un papel de filtro humedecido. Se introdujo en el desecador un vaso que contenía 25 mL de cloroformo libre de etanol y unos gránulos de control de la ebullición, y otro vaso que contenía Na₂CO₃. Se tapó el desecador y se hizo el vacío mediante una bomba de vacío, lo cual provocó la ebullición del cloroformo, y tras dos minutos de ebullición se detuvo la bomba y se cerró la válvula del desecador. Se dejó en un incubador a 25°C en oscuridad durante 24 h. Pasado este tiempo, se retiró el vaso de precipitados con el cloroformo y el papel de filtro del desecador. Se eliminaron los vapores de cloroformo del suelo haciendo vacío en el desecador 6 veces durante 2 min cada vez. Finalmente se procedió a la extracción del carbono orgánico, tanto de las muestras fumigadas como de las no fumigadas. Para ello, se añadieron 25 mL de K₂SO₄ 0,5 M y se agitaron en el agitador rotativo a 200 r.p.m. para posteriormente filtrarse a través de papel de filtro Whatman nº42. Las muestras se congelaron permitiendo así obtener filtrados más limpios. Para la determinación del carbono orgánico soluble se siguió el método de Yakovchenko y Sikora (1998) descrito en la sección 3.3.3.

Cálculos:

$$C_{\text{biomasa}} = E_c / K_{EC}$$

Donde:

$$E_c = [\text{Corg fumigado}] - [\text{Corg no fumigado}]$$

$$[\text{Corg fumigado}] = \text{C orgánico extraíble en el suelo fumigado}$$

[Corg no fumigado] = C orgánico extraíble en el suelo no fumigado

$K_{EC} = 0,38$ (Vance y col., 1987).

3.3.5 Respiración microbiana

La respiración del suelo o actividad mineralizadora de carbono, se encarga de cuantificar la cantidad de CO_2 producido tras los procesos metabólicos de los organismos vivos presentes en él.

El procedimiento usado para su medición consiste en la incubación de muestras en condiciones de humedad y temperatura óptimas en un sistema cerrado. Las mediciones de CO_2 se realizan cada 24h en un período de 4 días. Para la correcta realización de esta medición se extraen de las muestras las raíces que puedan contener, así como los macroorganismos.

Procedimiento: Se pesaron 10 g de suelo seco en los matraces y se taparon. Se colocaron las muestras en una cámara de incubación a $25^{\circ}C$. A las 24 h de incubación se procedió a la medición de la concentración de CO_2 de cada matraz. Después de la medición se abrieron y airearon los matraces para seguidamente volverse a cerrar. Se volvieron a dejar en la cámara de incubación y transcurridas 24 h se procedió a una nueva medición. Se repitió este proceso hasta transcurridas 96 h (4 días). Se prepararon matraces sin suelo (blancos) que siguieron el mismo proceso.

3.3.6 Nitrógeno

3.3.6.1 Nitrógeno mineral.

Se determinó el contenido en nitrógeno inorgánico (nitratos y amonio) en el suelo.

Procedimiento: Se pesaron 5 gramos de suelo húmedo en matraces erlenmeyer y se añadieron 50 mL de KCl 2M a cada uno. Se agitaron durante 1 hora a 125 r.p.m., dejando luego sedimentar unos minutos. Se decantaron en botellas de 60 mL y se centrifugaron durante 10 minutos a 2500 r.p.m. Se pasó el sobrenadante por un tamiz de malla $74 \mu m$ y se guardó en nevera hasta la determinación del contenido en nitratos y amonio.

Determinación de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$: La determinación se llevó a cabo utilizando un FIAStar 5000 Analyzer FOSS TECATOR. Los patrones para la determinación de los nitratos se prepararon a partir de una disolución de nitrato potásico. Para la determinación del amonio los patrones se prepararon a partir de una disolución de cloruro de amonio. Los patrones al igual que las muestras se prepararon en KCl 2 M.

3.3.6.2 Incubaciones in situ (N lixiviado, nitrificación y mineralización)

Para la realización de las incubaciones in situ, se usaron tubos con una bolsa de mezcla de resinas de intercambio catiónico y aniónico, en su extremo inferior (DiStefano y Gholz, 1986; Binkley y Hart 1989; Robertson y col., 1999). Se rellenaron con suelo

alterado todos los tubos de la parcela intentado conseguir la misma compactación en cada uno de ellos. Cada parcela disponía de 9 tubos, sustituyéndose cada dos meses por uno nuevo. Conociendo el nitrógeno inicial de los tubos, el nitrógeno después de dos meses de incubación y el nitrógeno captado por las resinas se obtuvieron el nitrógeno lixiviado, el nitrógeno de la nitrificación y el nitrógeno de la mineralización.

Material: se utilizaron las resinas de intercambio iónico (Dowex® 1X8 forma Cl⁻ 100-200 mesh, Dowex® 50X8 forma H⁺ 50-100 mesh), medias de nailon, tubos de pvc de 0,15 m, juntas tóricas y pistola de silicona.

Procedimiento:

Lavados iniciales de las resinas: Se lavaron las resinas con agua desionizada y agitación continua para eliminar cualquier impureza, así como partículas adheridas. Se trata de un paso imprescindible para que no haya interferencias en el posterior análisis colorimétrico y en sus resultados.

Conversión de las resinas a la forma iónica requerida: Se cambió la resina de la forma H⁺ a K⁺ antes de su uso. Este proceso se recoge más adelante, así como el proceso de lavado de la resina aniónica.

Montaje de los tubos de incubación:

Para la preparación de las bolsas de resina se usaron juntas tóricas y medias de nailon, haciendo uso de silicona para su unión. Posteriormente se añadieron 2,5 g de resina seca catiónica y 2,5g de resina seca aniónica. Finalmente se taparon y guardaron los tubos en la nevera a 4°C, dejando las resinas cubiertas de agua desionizada.

Montaje en campo:

Se retiraron de 0 a 10 cm de suelo en zonas próximas a los puntos de muestreo. Este suelo se usó para su análisis en el laboratorio y para el relleno de los tubos de incubación.

Recogida y sustitución de los tubos de incubación:

Se dejaron incubar dos meses los tubos y posteriormente se tamizaron en fresco en un tamiz de 2mm. A la vez que se retiran los tubos se incorporan nuevos con sus respectivas resinas y se llenan de suelo.

Extracción y análisis: Se realizaron las extracciones mediante envases de polipropileno. Se extrajo el nitrógeno del suelo del interior de las resinas mediante el mismo procedimiento usado para la extracción del nitrógeno mineral, descrito en el apartado anterior (3.3.5.1). La extracción se produjo en 3 fases: 1ª) con 40 ml KCl 2M 1 hora, 2ª y 3ª) con 30 ml KCl 2M 1 hora, después se guardó en nevera hasta su análisis. El análisis se realizó con un FIAStar 5000 Analyzer FOSS TECATOR.

Las especificaciones de las resinas se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Características de las resinas de intercambio iónico.

	Resina aniónica Dowex® 1x8 forma Cl ⁻	Resina catiónica Dowex® 50x8 forma H ⁺
Tipo	Geliforme	Geliforme
Matriz	Estireno-divinilbenceno	Estireno-divinilbenceno
Descripción	Fuertemente básica	Fuertemente ácida
Reticulación (%)	8%	8%
Contraión	Cl ⁻	H ⁺
Humedad	39-45%	50-58%
Tamaño granular	100-200 mesh	50-100 mesh
Capacidad	1,2 meq/mL resina húmeda	1,1 meq/mL resina húmeda
Número CAS	69011-19-4	69011-20-7
Fluka	44324	44504

Los procesos de intercambio catiónico y aniónico quedan recogidos en la Figura 12.

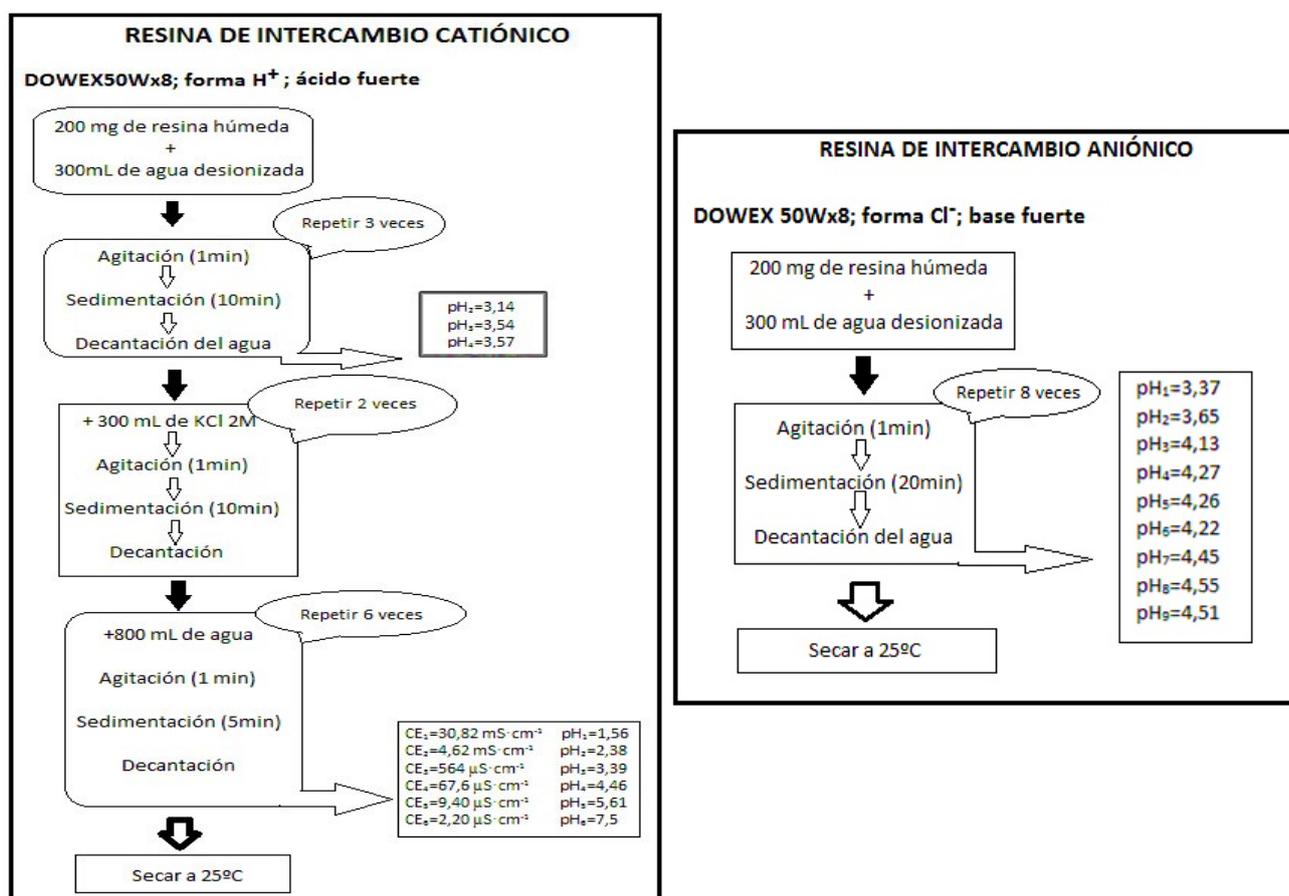


Figura 12. Proceso de intercambio de la forma de la resina catiónica y aniónica.

Las Figuras 13 y 14 recogen el proceso de elaboración de un tubo de incubación y detalle de la colocación de un tubo de resina en campo.

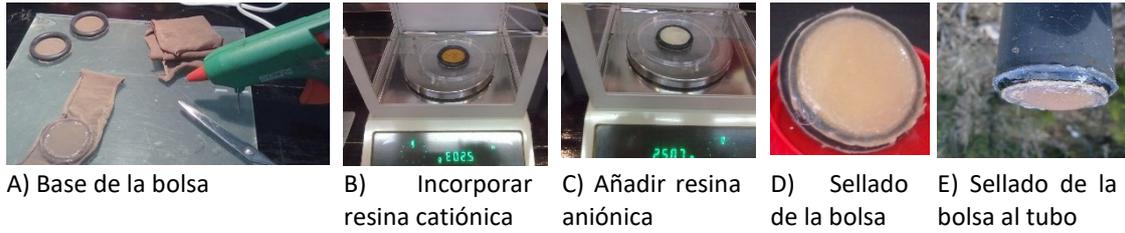


Figura 13. Proceso de elaboración del tubo de resina.



Detalle de la colocación del tubo de incubación



Tubo de incubación enterrado en el suelo

Figura 14. Detalle de los tubos de resina en el campo.

Cálculos:

$$N_{\text{mineralizado}} = N_{\text{min } i+1} - N_{\text{min } i} + N_{\text{min resina}}$$

$$N_{\text{nitrificado}} = N\text{-NO}_3^-_{i+1} - N\text{-NO}_3^-_i + N\text{-NO}_3^-_{\text{resina}}$$

$$N_{\text{lixiviado}} = N_{\text{min resina}}$$

$$N_{\text{min}} = N\text{-NO}_3^- + N\text{-NH}_4^+$$

4. RESULTADOS

Cuando se realiza un tratamiento selvícola el medio edáfico se ve afectado, sobre todo la actividad biológica del suelo. Esto se debe a que las condiciones microclimáticas, sobretodo la humedad y la temperatura, y los aportes orgánicos del suelo (biomasa viva, restos vegetales, hojarasca, etc.) se ven modificados con la retirada de masa forestal.

Los cambios producidos una vez realizado el tratamiento selvícola pueden apreciarse a corto y largo plazo. Para conocer estos cambios y evaluar si afectan positiva o negativamente al área tratada se analizan las propiedades bioquímicas y biológicas del suelo de la zona de estudio, tanto de la parcela tratada como de la parcela control, y se comparan los resultados obtenidos para obtener una conclusión.

4.1. Caracterización del suelo

La zona de estudio ha sido analizada con anterioridad, por lo que se han podido recopilar los siguientes datos sobre las características físico-químicas de las parcelas estudiadas.

Tabla 4. Características físico-químicas de los suelos de las parcelas de estudio. Fuente: Sánchez (2015).

	Control	Tratada
Arcilla (%)	27,8	32
Limo (%)	36,2	32
Arena (%)	36	36
Clase textural	Franco arcilloso	
Materia orgánica (%)	8,74±4,96	7,58±5,11
pH (H ₂ O)	8,12	8,00
CE 1:2.5 (des/m)	0,30	0,32
Carbonatos (g/kg)	388	297
Capacidad de retención de agua (%)	73,86	71,42

En dicho estudio se obtuvo el porcentaje de las fracciones granulométricas de la tierra fina (arcilla, limo y arena), para posteriormente conocer el tipo de **textura** del suelo haciendo uso del triángulo de textura del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (U.S.D.A). Se obtuvo que el suelo poseía una textura franco arcillosa. El porcentaje de **materia orgánica** de los suelos es de 8,74 %, en la parcela control, y 7,58 %, en la parcela tratada. Según Cortiba y Vallejo (1994) el tratamiento selvícola produce un aumento de la temperatura del suelo, lo que produce un aumento en la descomposición de la materia orgánica y las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Cuando se realiza un tratamiento a una masa forestal es muy importante conocer el **pH** del suelo, ya que de él depende el comportamiento del suelo y el crecimiento de las plantas. Se puede observar en la Tabla 4 que el pH obtenido en el estudio anteriormente realizado en dichas parcelas fue de 8,12 (parcela Tratada) y 8,00 (parcela Control). La

conductividad eléctrica obtenida fue de 0,30 dS m⁻¹ (Tratada) y de 0,32 dS m⁻¹ (Control) por lo que no se consideran suelos salinos.

Por otra parte, el contenido en **carbonatos** de las parcelas es de 297 g Kg⁻¹ (Tratada) y 388 g Kg⁻¹ (Control). Estos carbonatos suelen derivar directamente el material original, aunque pueden proceder de fuentes externas al ser transportados por el viento o el agua. Estos carbonatos pueden afectar a la capacidad de almacenaje de nutrientes y su asimilación.

La **capacidad de retención de agua** es la cantidad de agua que contiene el suelo una vez finalizado el drenaje gravimétrico. Este parámetro es importante tanto para el desarrollo de la vegetación como para la actividad de los microorganismos. Este parámetro es uno de los más importantes para tener en cuenta en zonas caracterizadas por presentar un clima mediterráneo, pues este clima se caracteriza por sus periodos estivales sin precipitaciones, produciendo considerables sequías, y periodos otoñales con gran cantidad de precipitaciones, pudiendo llegar al límite de torrenciales. La parcela Tratada presenta 2% menos de capacidad de retención de agua que la parcela Control, un 71,42% frente un 73,86%.

4.2. La humedad del suelo

El agua es un elemento esencial para todos los seres vivos ya que participa en las reacciones metabólicas de las células. Esta actúa como un solvente, portando los nutrientes desde el suelo hasta el interior de la planta. El agua es beneficiosa para el suelo, pero no en exceso ya que aumenta la lixiviación de sales y compuestos.

La incidencia de la radiación solar, la evapotranspiración y el aporte de residuos orgánicos son factores que al aplicar un tratamiento selvícola pueden producir cambios en el régimen hídrico del suelo.

Con la retirada de vegetación la cantidad de agua infiltrada cambia, ya que aumenta la escorrentía y la evapotranspiración se ve alterada. La velocidad de descomposición y la mineralización de los residuos orgánicos dependen en gran medida de la humedad. La importancia del conocimiento de los cambios en la humedad de las parcelas viene dada por la necesidad de evaluar y cuantificar los cambios en la dinámica de los ciclos de nutrientes, ya que estos se ven alterados tras un tratamiento selvícola y así se puede asegurar una buena gestión de esta masa forestal.

4.2.1. Humedad en el mantillo

La humedad en el mantillo presenta un valor máximo, como se puede observar en la Figura 15, en la posición 3 para ambas parcelas. Después de un análisis del sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada y tras comprobar que la distribución de los datos fuera normal (los valores de estos estadísticos deben encontrarse entre -2 y +2) se procedió a la realización de una ANOVA simple para conocer si existen diferencias

significativas de los datos. En lo referente a la relación humedad y tratamiento, se pudo observar que no existían diferencias significativas entre la parcela control y la tratada, pero al estudiar la humedad y el tratamiento dependiendo de la posición si apareció una diferencia significativa entre las parcelas en la posición 3. Esto podría deberse a que la época de muestreo coincidió con una época de fuertes precipitaciones, por lo que la zona más baja de la pendiente es la que más cambios podría otorgar debido a la infiltración, la escorrentía superficial y las propias características del suelo y el terreno.

En estudios anteriores de los efectos selvícolas sobre parcelas de *P. halepensis* se ha podido observar que la humedad del suelo tiene un comportamiento diferente según la intensidad del tratamiento (Lado y col., 2009).

Cabe destacar que el hecho de que este estudio esté basado en un solo muestreo, no refleja la realidad de lo que sucede en la parcela con exactitud. En estudios anteriores, donde el muestreo duró 6 meses se pudo observar que no existían diferencias significativas en la humedad de ambas parcelas a lo largo de los 6 meses.

Se puede observar claramente que la parcela tratada presenta un porcentaje de humedad menor que el de la parcela control a lo largo de todas las posiciones, esto es debido, según un estudio de Fisher y Binkley (2000), a que después del tratamiento y tras la eliminación parcial de la vegetación se reduce la interceptación, así como la extracción por las raíces.

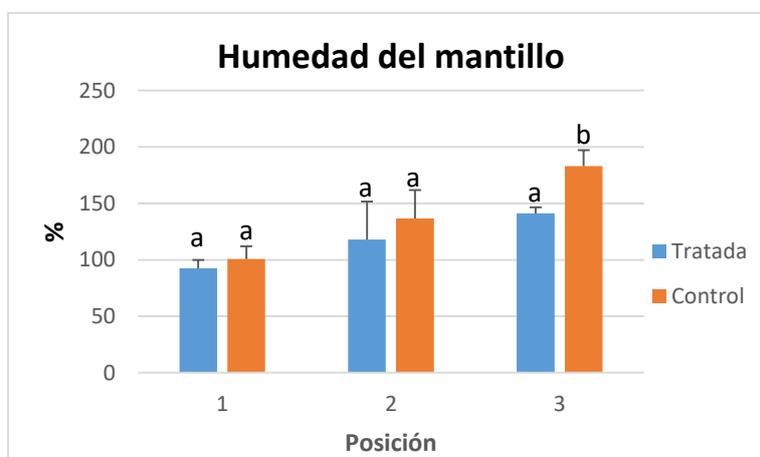


Figura 15. Humedad (%) del mantillo en la primera fecha de muestreo. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.2.2. Humedad en el suelo mineral

Se puede observar en la Figura 16 que, tanto en septiembre como en diciembre, el mayor contenido en humedad se encuentra en la posición uno para la parcela Control, mientras que en la parcela Tratada la posición con mayor contenido en humedad se daría en la posición dos.

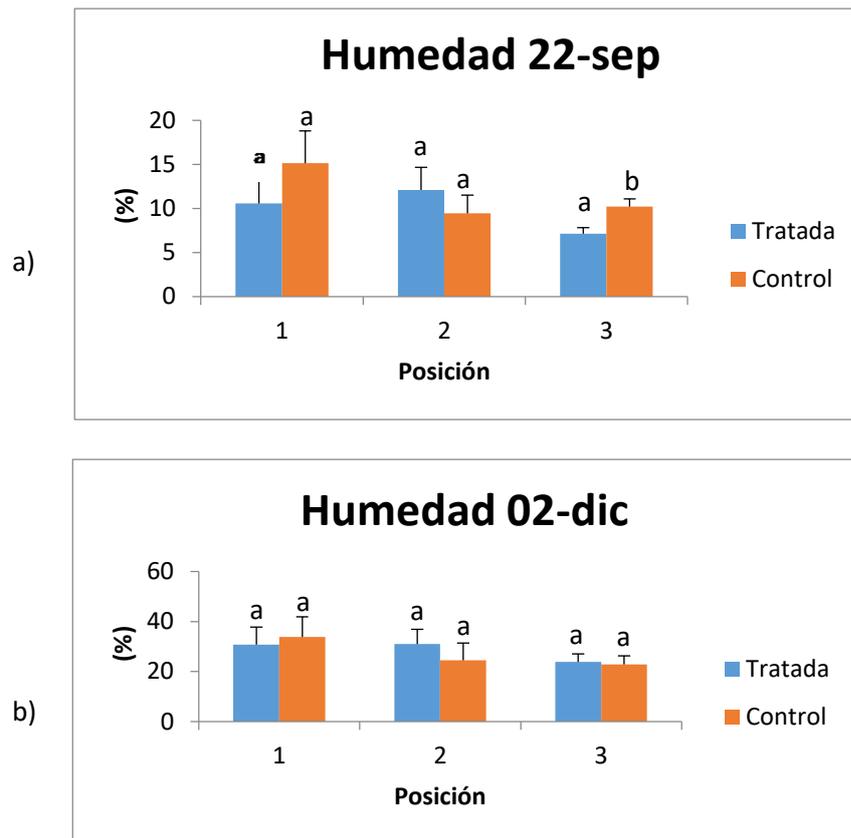


Figura 16. a) y b) Humedad (%) en suelo mineral de las parcelas Tratada y Control, en el muestreo inicial y final. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

A la hora de analizar las siguientes figuras cabe destacar que la humedad del suelo se vio alterada de un periodo a otro, ya que como se ha podido observar en el apartado *Material y Métodos* el mes de noviembre se registró como uno de los meses con mayor precipitación del año 2016, llegando las lluvias a alcanzar valores de hasta 140mm. Es por eso por lo que si se aprecia los valores obtenidos se puede apreciar que en todas las posiciones y en ambas parcelas la humedad aumenta, por ejemplo, en la posición 1 en la parcela control se pasa de una humedad del 10% en el mes de septiembre a una humedad del 30% en el mes de diciembre. Aunque si analizamos los datos la humedad aumenta más considerablemente en ambas parcelas en la posición 3 (parte inferior de la parcela).

En lo referente a las diferencias significativas entre parcelas es inexistente, pero cuando se analiza la posición de las muestras se puede observar que aparece una diferencia significativa en la posición 3 del muestreo realizado en septiembre. Esto podría deberse a que ese mes también hubo un periodo de lluvias después de una gran temporada de sequía estival, por lo que la parte inferior de la pendiente es la que más diferencias puede presentar por los mismos motivos expuestos anteriormente.

4.3. Respiración

La respiración del suelo es un proceso que refleja la actividad biológica del mismo. Esta se conoce por la cantidad de CO₂ que es desprendido o por el oxígeno que es consumido durante el metabolismo de los organismos vivos presentes en el suelo (Anderson, 1982).

Los microorganismos heterótrofos degradan la materia orgánica para obtener energía a través de la descomposición de compuestos como la celulosa, proteínas, nucleótidos, etc. Este proceso es lo que se conoce como respiración microbiana y consiste en reacciones redox de oxidación de la materia orgánica. El oxígeno es el aceptor final de electrones obteniéndose como producto final CO₂, agua y energía.

Como se puede observar en la Figura 17 la respiración microbiana va descendiendo a medida que van pasando los días, tanto en la parcela control como en la tratada. Se puede observar que la respiración sigue una linealidad descendiente en ambas parcelas, y que los valores obtenidos son bastante similares.

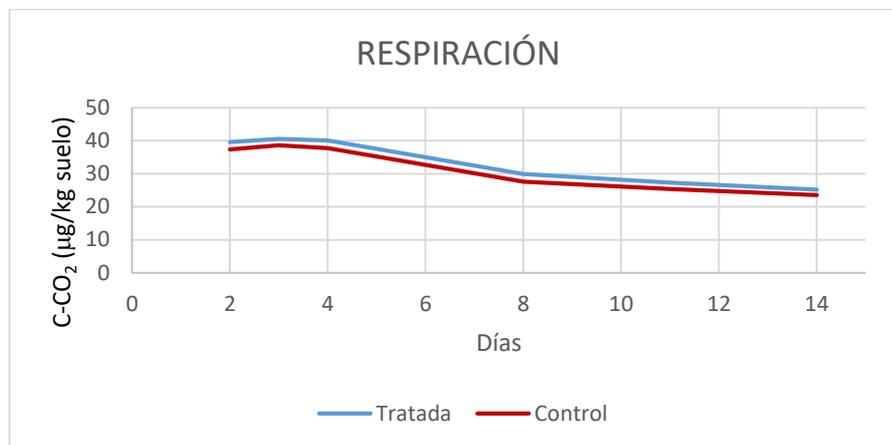


Figura 17. Respiración basal (C-CO₂ (mg kg⁻¹ s)) en las parcelas Tratada (T) y Control (C) en el segundo periodo de muestreo.

Los factores abióticos que suelen afectar a la respiración son la temperatura, el oxígeno disuelto, la humedad, el pH y la disposición de nutrientes. La actividad biológica máxima generalmente ocurre cuando el 60% de los poros del suelo están ocupados por agua (Parkin et al. 1996). La cantidad de agua en el espacio de poros es denominada espacio poroso ocupado por agua (EPOA) y es indicativa del grado de aireación del suelo al momento del muestreo.

Según la tabla de Índices generales para la respiración del suelo, en condiciones óptimas de temperatura y humedad de Woods End Research (1997), el suelo de ambas parcelas se encontraría en condiciones de actividad ideal durante los primeros 4 días, pero una vez transcurrida una semana la actividad del suelo empieza a bajar pasando a una actividad moderadamente baja. Esta disminución de la actividad se debe a que el suelo pierde parte de la materia orgánica disponible.

4.4. Carbono orgánico soluble (COS)

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica formada por residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de los organismos presentes, así como las sustancias que producen y vierten en el suelo. Según investigadores como Reeves (1997); Leifeld y Kögel-Knabner (2005) el contenido en materia orgánica es un componente esencial del suelo, además de ser un indicador clave de la calidad del suelo. La medida de la susceptibilidad del carbono orgánico del suelo a la mineralización es esencial, ya que permite predecir la respuesta, a corto plazo, de los reservorios biosféricos de carbono a los cambios en las condiciones ambientales. Según Campbell y Zentner (1993) los derivados solubles en el agua proceden de la degradación de compuestos de carbono orgánico más estable en el suelo o de exudados procedentes de las raíces.

4.4.1. Carbono orgánico soluble en el mantillo

Como se puede observar en la Figura 18 no existen diferencias significativas en el contenido de COS, entre la parcela Control y Tratada, al igual que no lo existe para las diferentes posiciones a lo largo de la parcela. Los valores máximos de COS se encuentran tanto en la parcela Control como en la Tratada en la tercera posición, es decir, en la zona más baja de ambas parcelas. Aun que no existan diferencias significativas se puede observar claramente en ambas figuras que la parcela Tratada presenta un mayor contenido de COS, exceptuando en la posición 2, en la cual es la parcela Control la que presenta una concentración mayor. Teniendo en cuenta los datos de humedad, donde el mayor porcentaje de se encuentra en la posición 2, podría decirse que esto se debe a que el agua queda retenida en este punto de la parcela, por eso los componentes solubles y la humedad son mayores en este punto. Debido a que la parcela se encuentra en una zona montañosa es posible que haya algún material obstaculizador en esta posición de la parcela que impida la infiltración del agua hacia un punto más bajo.

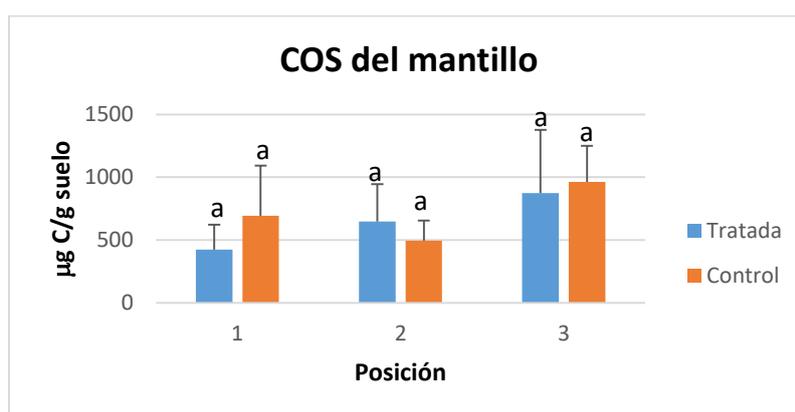


Figura 18. Carbono orgánico soluble en el mantillo de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.4.2. Carbono orgánico soluble en el suelo mineral

En este caso, se realizó el estudio de la normalidad como se ha explicado anteriormente y puesto que los datos no cumplían la regla de encontrarse entre 2 y -2, se procedió a realizar una transformación de los datos. En el caso del COS se tuvo que realizar la arcotangente de los datos para conseguir que estos siguieran una distribución normal.

Las medidas del COS en el suelo mineral son, aproximadamente, 3 veces menores que las medidas obtenidas en el horizonte horizontal. Como se puede observar en la Figura 19 existe una diferencia significativa en la posición 2 de la parcela entre la parcela tratada y control. Aunque al analizar las parcelas no exista una significación aparente, a nivel de posición si que la hay. Se observa que el contenido en COS de la parcela tratada supera en casi tres veces al contenido de la parcela control. También se puede apreciar que la parcela control mantiene un contenido de COS bastante igualitario en todas las posiciones (entre 75-86 $\mu\text{g C/g}$ suelo), mientras que en la parcela tratada tiene un aumento de la concentración en la posición 2 ($266.67 \pm 273.36 \mu\text{g C/g}$ suelo) y una bajada considerable en la posición 3 ($73.85 \pm 10.57 \mu\text{g C/g}$ suelo).

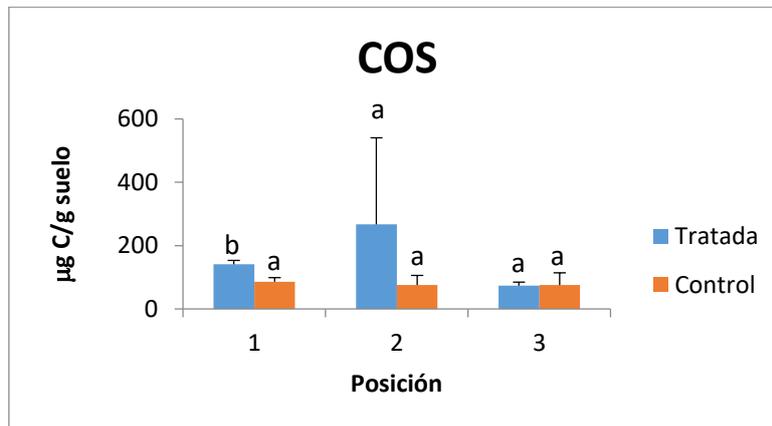


Figura 19. Carbono orgánico soluble en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.5. Carbono de la biomasa microbiana

La biomasa microbiana constituye el componente vivo de la materia orgánica del suelo, representa la fracción lábil y contiene del 1-3% del carbono total y hasta el 5% del nitrógeno total. Por lo que se ve alterado con mucha facilidad ante cualquier efecto de perturbación del suelo. La Biomasa Microbiana es la responsable de la descomposición de residuos orgánicos, del flujo de energía dentro del ecosistema suelo, del ciclo de nutrientes y del reciclaje de estos. Según Van Gestel et al (1992) las alteraciones en estas vienen dadas por las propiedades y características de la propia masa microbiana y las condiciones ambientales, más que por las propias características edáficas. Generalmente los suelos de ecosistemas forestales tienen mayores niveles de biomasa microbiana que los suelos de cultivo.

Al estudiar la significación del carbono de la biomasa microbiana se puede observar que no hay diferencias significativas dependiendo del tratamiento y la posición de las parcelas.

Como se puede observar en la Figura 20 la mayor concentración de CBM se encuentra en la posición 1 en ambas parcelas, esto podría deberse a una mayor temperatura debida a la incidencia directa de la radiación solar y a la disponibilidad de nutrientes en esta zona de la parcela. Aun así, se puede observar que la concentración de CBM para la parcela tratada varía de 870.37-561.17 $\mu\text{g C/g}$ suelo, mientras que la parcela control varía de 971.87-525.41 $\mu\text{g C/g}$ suelo.

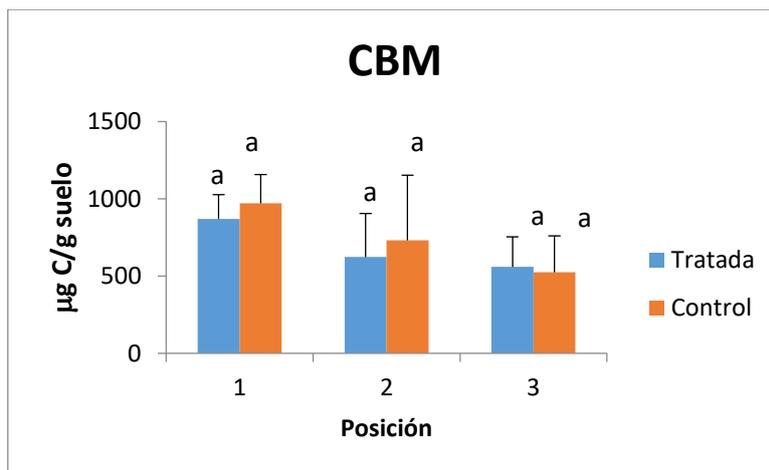


Figura 20. CBM en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.6. Nitrógeno en el suelo mineral

4.6.1. Nitrógeno amoniacal

El amonio se encuentra en el suelo adsorbido en el complejo de cambio, en la solución del suelo o fijado en las redes cristalinas de determinadas arcillas. El amonio fijado en las arcillas es difícilmente cambiabile, pero hay cationes que provocan la expansión de las arcillas, pudiendo así liberarse el amonio y pasar a la solución del suelo.

Por otro lado, el amonio adsorbido en el complejo de cambio, es desplazado por otros cationes y pasa fácilmente a la solución del suelo.

4.6.1.2. Nitrógeno amoniacal en el suelo mineral

Para el estudio de esta variante, se tuvieron que modificar los datos para conseguir que estuvieran dentro de la normalidad. En este caso se ha aplicado el coseno sobre los datos originales para conseguir la normalidad.

Los valores de NH_4^+ obtenidos en ambos periodos de muestreo son muy diferentes, pero ambos se caracterizan en que no existen diferencias significativas entre las parcelas según si están tratadas o dos. Aunque si existe una diferencia significativa en el

nitrógeno amoniacal del muestreo de septiembre en la posición 2. Como se ha comentado anteriormente, parece haber algún obstáculo físico o característica edáfica en la posición dos de la parcela tratada que produce un resultado muy dispar de los datos. Como se puede observar en la Figura 21 en septiembre la cantidad de nitrógeno amoniacal presente en la parte superior (posición 1) de las parcelas es casi 8 veces mayor que en la posición 3, mientras que en la posición 2 la concentración de la parcela tratada es mayor que la de la parcela control en ambos periodos. Si se analiza la Figura 21 se puede observar que la concentración de amonio en la posición 1 de ambas parcelas ha disminuido drásticamente. En la parcela tratada se pasa de una concentración de $14.65 \pm 2.61 \mu\text{g N-NH}_4^+/\text{g suelo}$, en el mes de septiembre, a una concentración de $1.30 \pm 9.69 \mu\text{g N-NH}_4^+/\text{g suelo}$, en el mes de diciembre. Mientras que en la parcela control pasa de una concentración de $15.01 \pm 2.81 \mu\text{g N-NH}_4^+/\text{g suelo}$, en el mes de septiembre, a una concentración de $4.85 \pm 13.54 \mu\text{g N-NH}_4^+/\text{g suelo}$, en el mes de diciembre. Este suceso se debe al aumento de la humedad en el suelo debido a la época de precipitaciones producidas en noviembre. El nitrógeno atmosférico es convertido, por efecto de la precipitación, a otras formas de nitrógeno, modificando así las concentraciones de estos compuestos en el suelo. Como ya se ha dicho anteriormente el ion amonio pasa ion nitrito mediante procesos de oxidación, por lo que si el suelo se encuentra muy aireado este cambio se produce con una mayor facilidad.

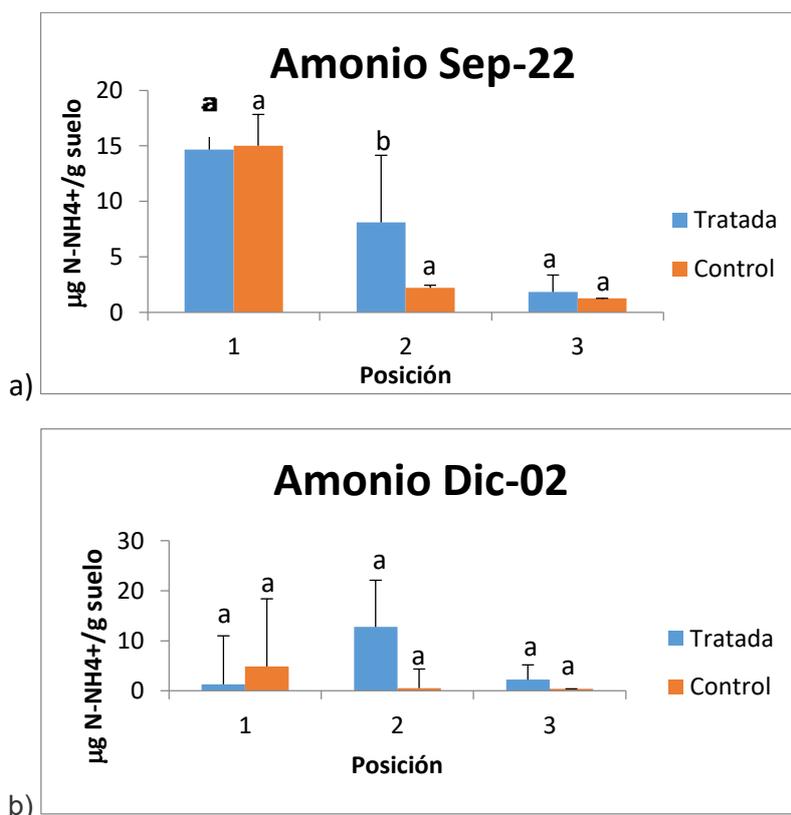


Figura 21. a) Nitrógeno amoniacal en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de septiembre. b) Nitrógeno amoniacal en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de diciembre. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.6.2. Nitrógeno nítrico

El nitrato, se encuentra libre en la solución del suelo y es asimilado por las plantas y los microorganismos. Por efecto de la precipitación puede ser arrastrado a horizontes profundos del suelo. La cantidad de nitrato que puede ser lixiviado depende de la intensidad de las lluvias, de la capacidad de retención de, de la dosis de riego, humedad del suelo, y de las características del su sistema radicular de la vegetación. Así mismo, los durante las estaciones secas pueden producirse movimientos ascendentes del agua a la superficie provocando el ascenso de los nitratos a horizontes superficiales del suelo.

4.6.2.1. Nitrógeno nítrico en el mantillo

Para el estudio de esta variante, se tuvieron que modificar los datos para conseguir que estuvieran dentro de la normalidad. En este caso se ha aplicado la raíz cuadrada sobre los datos originales.

En este caso no existen diferencias significativas entre las parcelas ni entre las posiciones. Se observa que la parcela control tiene concentraciones más altas de nitrógeno nítrico en la posición 1 y 3, mientras que en la posición 2 es la tratada la que tiene una concentración mayor. La parcela tratada tiene una concentración 3 veces mayor en la posición 1 que en la 3 tal y como se puede observar en la Figura 22.

Como se ha dicho anteriormente el nitrógeno nítrico depende de las precipitaciones así que puede que esta diferencia de concentración entre posiciones se deba al efecto de estas.

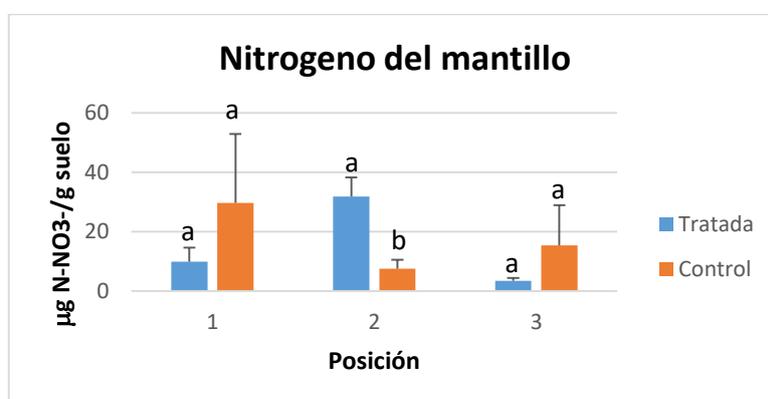


Figura 22. Nitrógeno nítrico en el mantillo de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.6.2.2. Nitrógeno nítrico en el suelo mineral

Para el estudio de esta variante, se tuvieron que modificar los datos para conseguir que estuvieran dentro de la normalidad. En este caso se ha aplicado el seno sobre los datos originales.

Se puede observar un aumento de la concentración de nitratos en el mes de diciembre frente al de septiembre, esto podría deberse a las lluvias producidas en noviembre.

Como se puede observar en la Figura 23 no existen diferencias significativas entre la parcela control y tratada, así como tampoco las hay en lo referente a las posiciones en las parcelas. La concentración de nitratos se ve incrementada notablemente en la posición 1 tanto para la parcela control como para la tratada, pasando de una concentración de $4.03 \pm 0.87 \mu\text{g N-NO}_3^-/\text{g suelo}$ en septiembre a $32.69 \pm 3.23 \mu\text{g N-NO}_3^-/\text{g suelo}$ en diciembre y de $2.18 \pm 0.94 \mu\text{g N-NO}_3^-/\text{g suelo}$ a $15.25 \pm 4.51 \mu\text{g N-NO}_3^-/\text{g suelo}$, respectivamente.

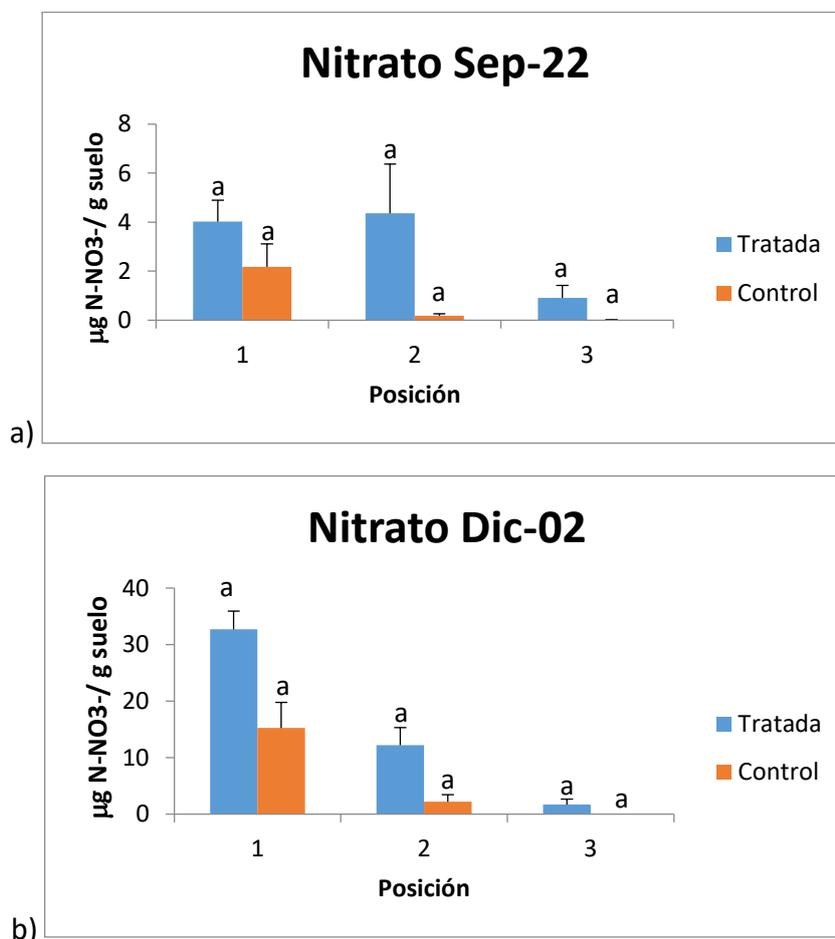


Figura 23. a) Nitrógeno nítrico en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de septiembre. b) Nitrógeno nítrico en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de diciembre. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD ($p \text{ valor} \leq 0.05$).

4.6.3. Nitrógeno mineral

El nitrógeno mineral es el nitrógeno resultado de la mineralización del nitrógeno orgánico. Este proceso depende de la temperatura, la humedad y la aireación del suelo. Al estudiar la significación se observa que no existen diferencias significativas entre la parcela tratada y control, pero al realizar el estudio de la significación según la posición se observan diferencias significativas entre las parcelas, en el mes de septiembre, en la posición 2.

La concentración de nitrógeno mineral aumenta de septiembre a diciembre en todas las posiciones de la parcela tratada, mientras que en la posición 3 de la parcela control se

ve reducido. Donde más se puede apreciar este aumento es en la parcela tratada en la posición 1 y 2, ya que la concentración prácticamente se duplica en ambas parcelas.

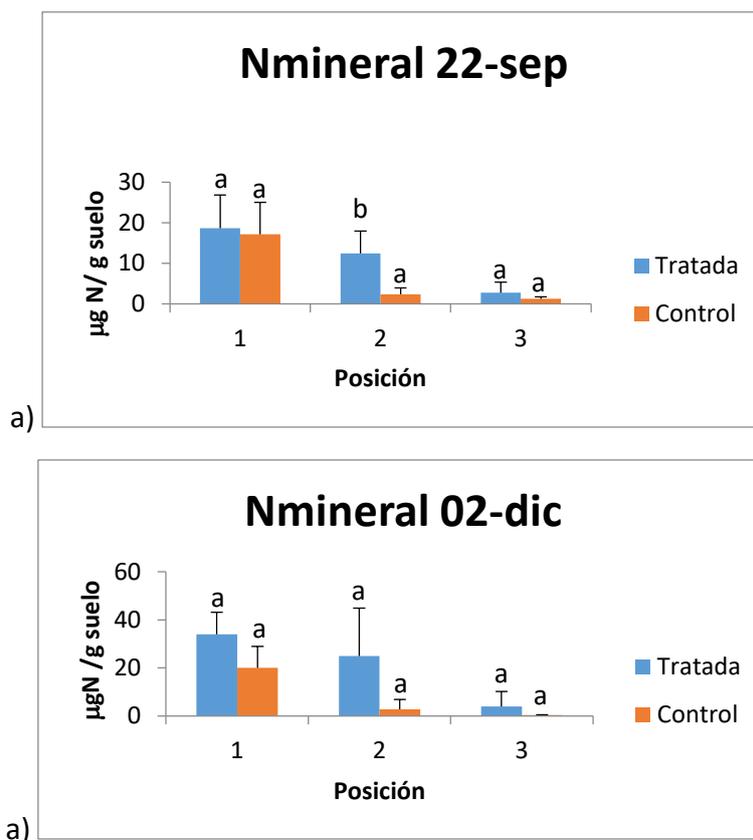


Figura 24. a) Nitrógeno mineral en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de septiembre. b) Nitrógeno mineral en el suelo mineral de los diferentes muestreos en las parcelas tratada y control en el mes de diciembre. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

4.7. Flujos de nitrógeno

La aplicación de un tratamiento selvícola afecta a las transformaciones de nitrógeno en el suelo, incrementando la mineralización, nitrificación y lixiviación.

4.7.1. Mineralización

Los suelos forestales son grandes sumideros de carbono y nitrógeno por eso son tan importantes en los ciclos de estos elementos. Una de las funciones más importantes del suelo es la de secuestro de carbono, de ahí la importancia de conocer la cantidad de materia orgánica acumulada en los suelos procedente de la masa arbórea de los bosques mediterráneos. La mineralización y la inmovilización debe considerarse junto a la nitrificación, ya que las tres se encuentran interrelacionadas. La nitrificación se encarga de la transformación de cationes de nitrógeno (poco móviles), como el amonio, en aniones muy móviles como es el caso del nitrato. De ahí su importancia para conocer las pérdidas de nitrógeno por lixiviación o desnitrificación, al formarse óxidos nitrosos

gaseosos al reducirse N-NO_3^- gracias a las bacterias anaeróbicas. La nitrificación depende del pH, humedad, temperatura, relación C:N, disponibilidad de N-NH_4^+ , oxígeno y la población microbiana. Es por todo esto que la mineralización es muy cambiante en el tiempo y el espacio, lo que la hace un proceso impredecible.

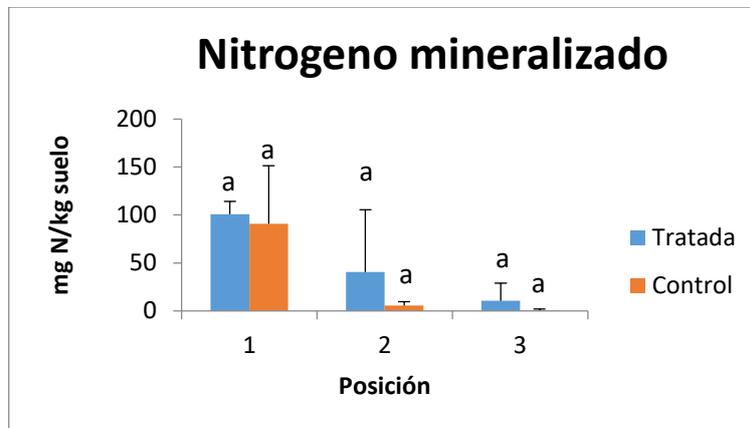


Figura 25. Mineralización por posición de las muestras y el tratamiento de la parcela. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

La mineralización se ve afectada por la pendiente, ya que los mayores niveles de mineralización, al igual que de lixiviación se encuentran en la parte superior de la parcela. Puesto que solo se ha realizado dos muestreos no es posible hablar de la evolución de estos procesos, pero en estudios anteriores se observó que las tasas más elevadas de mineralización y nitrificación coincidían en los periodos con temperaturas más elevadas y con mayor humedad en el suelo. En ocasiones las tasas de mineralización pueden ser negativas, conocido como inmovilización neta. Esto ocurre cuando la cantidad de nitrógeno incorporado a la biomasa microbiana supera el nitrógeno mineralizado. En este caso no llega a producirse inmovilización, pues el valor más pequeño es de 0.46 mg N/kg suelo (corresponde a la parcela control en la posición 3).

4.7.2. Nitrificación

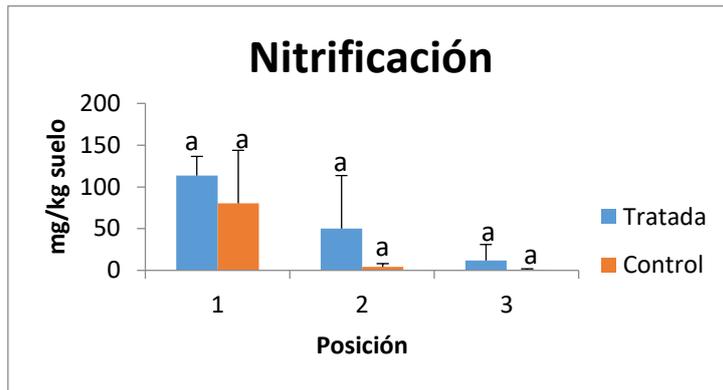


Figura 26. Nitrificación por posición de las muestras y el tratamiento de la parcela. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

Como se puede observar en la Figura 26 sería en la posición 1 donde se encuentran los valores más elevados de nitrificación tanto para la parcela control como para la tratada. Cabe destacar que la parcela tratada presenta niveles de nitrificación considerablemente más elevados que la parcela control en las 3 posiciones de esta misma. Siendo 10 veces mayor la concentración de la parcela tratada respecto a la control en la posición 2 y de 17 veces mayor en la posición 3.

4.7.3. Lixiviación

Según Cayuela (1993) en el suelo bajo de las masas forestales la dinámica del nitrógeno es conservativa, y la alteración de las condiciones naturales conduce a una alteración del ciclo del nitrógeno. Este cambio con frecuencia produce importantes pérdidas de nitrógeno, usualmente como nitrato hacia las aguas subterráneas. Aunque la pérdida de nitratos es un proceso para tener en cuenta por el riesgo potencial que representa para las aguas, el potencial riesgo viene dado por las fuentes de contaminación agrícolas.

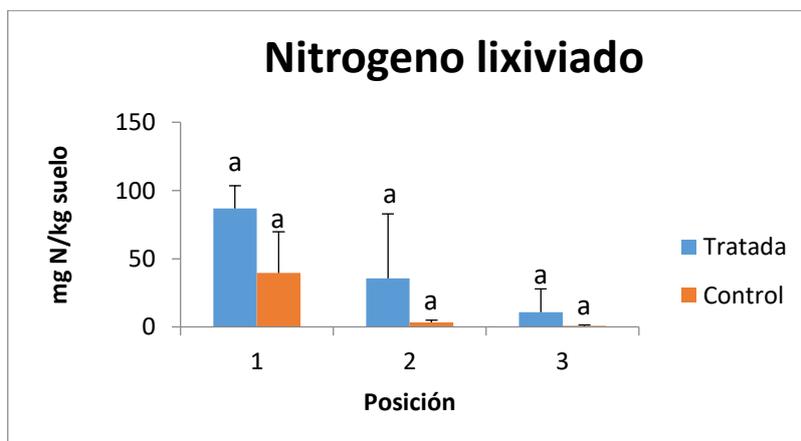


Figura 27. Lixiviación por posición de las muestras y el tratamiento de la parcela. Los datos señalados con la misma letra no son significativamente diferentes de acuerdo con el test LSD (p valor ≤ 0.05).

Se puede observar en la Figura 27 la pérdida considerable de nitrógeno a lo largo de la parcela. La posición 1 es la que más pérdida de nitrógeno presenta tanto para la parcela tratada como para la parcela control. Es destacable la pérdida de nitrógeno por lixiviación sobretodo en la parcela tratada. La adsorción de nitrógeno por las resinas está controlada por la movilidad del ion en el suelo y por concentración. Al aumentar la humedad la movilidad de este ion se ve reducida. Las resinas proporcionan un buen índice de la capacidad de flujo y disponibilidad del nitrógeno en el suelo debido a que tanto las resinas como las raíces de las plantas sufren una situación análoga.

Se han realizado muy pocos estudios en los cuales se hayan usado resinas de intercambio iónico en ecosistemas mediterráneos, por lo que resulta difícil comparar los resultados obtenido

4.8. Correlaciones entre variables

Seguidamente, se muestra el análisis de la correlación entre las diferentes variables del horizonte orgánico, de manera que sea posible determinar la relación o dependencia existente entre las variables, y así abarcar mejor los resultados globales.

Tabla 5. Valores de coeficientes de correlación y nivel de significación. (*, ** y *** significativa a $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ y $p \leq 0,001$, respectivamente. NS, no significativa).

	HUMEDAD	Respiración	N mineral	Amonio NH4+	Nitrato	CO S	CB M	N IR	Amonio IR	Nitrato IR	N Resina	Amonio R	Nitrato R	N mineralizado	N lixiviado
HUMEDAD	1														
Respiración	Ns	1													
N mineral	0,4174*	0,5967**	1												
Amonio NH4+	Ns	0,7576**	0,5603**	1											
Nitrato	0,537***	Ns	0,8137**	Ns	1										
COS	Ns	0,8164**	0,6461*	0,8726**	Ns	1									
CBM	0,5549*	Ns	0,5461*	Ns	0,5313*	Ns	1								
N IR	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	1							
Amonio IR	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	0,6444*	1						
Nitrato IR	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	0,9365**	Ns	1					
N Resina	Ns	Ns	0,5572*	Ns	0,6211*	Ns	Ns	0,5441*	Ns	0,688**	1				
Amonio R	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	0,793***	0,4694*	0,7641*	Ns	1			
Nitrato R	Ns	Ns	0,5578*	Ns	0,6235*	Ns	Ns	0,5381*	Ns	0,6828*	0,9999*	Ns	1		
N mineralizado	Ns	Ns	Ns	Ns	0,5044*	Ns	Ns	0,8522**	Ns	0,9072*	0,8969*	0,6316*	0,8939*	1	
N lixiviado	Ns	Ns	0,5572*	Ns	0,6211*	Ns	Ns	0,5441*	Ns	0,688**	1***	0,3668	0,9999*	0,8969***	1
Nitrificación	Ns	Ns	0,4739*	Ns	0,5157*	Ns	Ns	0,7285*	Ns	0,8542*	0,963**	0,9611*	0,9716***	0,963**	1

Se puede apreciar que la nitrificación presenta una amplia relación con el nitrato presente en el interior de la resina, el nitrógeno mineral de la resina y el nitrógeno mineralizado, esto es debido a que la nitrificación es la oxidación biológica del amonio para obtener nitrito y que posteriormente este sea oxidado para producir nitrato.

En el caso de la humedad se vería correlacionada con el CBM, ya que la masa microbiana necesita unas condiciones óptimas de humedad para poder realizar su actividad.

Las variables más relacionadas son la nitrificación, el nitrógeno lixiviado, el nitrógeno mineralizado, así como los nitratos que permanecen en la resina.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de un tratamiento selvícola a una parcela forestal produce un cambio en las propiedades químicas, biológicas y bioquímicas del suelo. El estudio a corto plazo de los efectos de este tratamiento sobre la calidad del suelo en el monte de la Calderona ha permitido descubrir los efectos, tanto positivos como negativos, de la aplicación de estos tratamientos en una parcela forestal mediterránea. Se ha observado que la parcela ha sufrido un cambio positivo en los valores de nitrógeno mineral, humedad, carbono orgánico soluble y la respiración, pero apenas se han encontrado diferencias significativas entre ambas parcelas.

En lo referente a la dinámica del nitrógeno mineral en el suelo, en la parcela tratada hay más nitrógeno inorgánico que en la parcela control, esto se podría deber a que se reduce la absorción de nitrógeno al haber menos vegetación. Aunque también en la parcela tratada hay mayores pérdidas de nitrógeno por lixiviación. La nitrificación es mayor en la parcela tratada. Por lo que se puede deducir que el tratamiento selvícola afecta al balance hídrico, es decir, al reducirse la intercepción de la lluvia por la cubierta vegetal y la absorción radicular se produce una mayor infiltración, que junto con el aumento de la concentración del nitrógeno mineral produce un aumento del nitrógeno lixiviado, lo que puede llegar a producir la eutrofización en los acuíferos.

Así mismo, cabe destacar que es imprescindible que un tratamiento selvícola esté bien diseñado e implementado para un buen manejo forestal. Los tratamientos selvícolas afectan a procesos importantes del suelo como son la transformación y descomposición de los restos orgánicos que llegan a formar parte del suelo. La productividad a corto y largo plazo de un bosque puede estar influenciada por cambios en el contenido en nutrientes del suelo es importante considerar estos cambios a la hora de gestionar las masas forestales.

A la hora de realizar un estudio sobre los efectos de la aplicación de un tratamiento selvícola sobre una masa forestal es necesario conocer, en la medida de lo posible, la mayor parte de las características de ese suelo, así como todos los cambios que puedan producirse.

Valorando la experiencia positivamente, no deja de ser conveniente la realización de más muestreos para un mejor análisis de los resultados, y una mejor exposición de conclusiones, pues como ya se ha dicho anteriormente hay muchos factores que afectan a las características de los suelos, entre ellos los climáticos que son muy variables a lo largo del año en la zona mediterránea.

Los futuros estudios de esta índole podrían encaminarse hacia el estudio paralelo de la afección del tratamiento selvícola sobre las variables más influyentes en el funcionamiento de un ecosistema forestal. Sería conveniente realizar el estudio del nivel de insolación, humedad y temperatura del suelo, cubierta vegetal, hidrología de las parcelas, etc. Pues muchas de las variables estudiadas dependen de estos factores.

6. BIBLIOGRAFIA

Agencia Europea de Medio Ambiente. 2004. Medio ambiente en Europa: tercera evaluación. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Madrid. 248pp

Alejanoi M.R., Martínez E., Tíscar A. 2000. Selvicultura en masas protectoras de pino carrasco en la cuenca del Guadiana menor. 10: 116-116.

Andrés M. 2015. Impacto ambiental de los tratamientos selvícolas e incendios en suelos forestales e la serranía de cuenca. Propuesta de un índice de recuperación de calidad del suelo. Tesis. Universidad de Castilla- La Mancha.

Attwill P.M., Adams M.A. 1993. Nutrient cycling in forest. *New Phytologist*, 124: 561-582.

Binkley D., Hart S.C. 1989. The components of nitrogen availability assessments in forest soils. En: *Advances in soil science*. Stewart S.A. (Ed.). Springer, New York. p. 57-112.

Crichton R.R. 2012. Chapter 18 Non-metals in Biology. En: *Biological inorganic chemistry: a new introduction to molecular structure and function*. Crichton R.R. (ed). Elsevier. p.343-358.

Daily G.C. 1997. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington, DC. 392 pp.

DiStefano J.F., Gholz H.L. 1986. A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 17: 989-998

Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma, 2010.

García C., Hernández T., Costa F. 1999. Suelos erosionados: bioindicadores de su calidad biológica y bioquímica. *Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 4:165-175.

Granados-Sánchez d., Lopez-Ríos G.F., Hernández-García M.A. 2007. Ecología y silvicultura en los bosques templados. *Serie ciencias forestales y del ambiente*. México. 13: 67-83.

Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkinen K., Byrne K. A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137: 253-268.

Latta G., Temesgen H., Adams D., Barrett T. 2009. Analysis of potential impacts of climate change on forests of the United States Pacific Northwest. *Forest ecology and management*, 259:720-729.

Larrieu L., Cabanettes A., Delarue A. 2012. Impact of silviculture on dead wood and on the distribution and frequency of tree microhabitats in montane beech-fir forests of the Pyrenees. 131:773-786.

- Linder M., Maroschek M., Netherer S, Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M., Marchetty M. 2009. Climate changes impacts, adaptative capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest ecology and management*, 259: 698-709
- Lupon A., Sabater F., Miñarro A., Bernal S. 2016. Contribution of pulses of soil nitrogen mineralization and nitrification to soil nitrogen availability in three Mediterranean forests. 303-313.
- Macdonald C. A., Anderson I. C., Bardgett R. D., Singh B. K. 2011. Role of nitrogen in carbon mitigation in forest ecosystems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3: 303-310.
- Miralles I., Ortega R., Sánchez-Marañón M, Leirós M.C., Trasar-Cepeda C., Gil-Sotres F., 2007. Biochemical properties of range and forest soils in Mediterranean mountain environments. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 721-729.
- Sastre C. 1999. Influencia de distintos tipos de impacto ambiental en la ecología microbiana de suelos de la comunidad de Madrid. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. 386p.
- Schimel J.P., Bennett J. 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85: 591-602.
- Palma D. 2011. Evaluación de la actividad biológica (Respiración y Biomasa microbiana) como indicadores de la salud de los suelos ubicados en San Joaquín, estado Carabobo. Universidad de Carabobo. Carabobo. 81p.
- Paz-Ferreiro J, Trasar-Cepeda C, Leirós MC, Seoane S, Gil-Sotres F. 2007. Biochemical properties of acid soils under native grassland in a temperate humid zone. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50: 537–548.
- Porta J., Reguerín M.L.A., Claret R.M.P. 2014. Edafología: uso y protección de suelos. Mundi-Prensa Libros.
- Prescott C.E. 1997. Effects of clearcutting and alternative silvicultural systems on rates of decomposition and nitrogen mineralization in a coastal montane coniferus forest. *Forest Ecology and Management*, 95: 253-260.
- Priha O., Grayston S.J., Pennanen T., Smolander A. 1999. Microbial activities related to C and N cycling and microbial community structure in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings in an organic and mineral soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 30: 187-199.
- Serrada R. 2008a. Avance apuntes de selvicultura. Ed. Serrada R. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Cap. I pag.3.
- Serrada R. 2008b. Avance apuntes de selvicultura. Ed. Serrada R. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Cap. XIV.
- Singer M.J., Ewing S.A. 2000. Soil quality. En: *Handbook of soil science*. Summer M.E. (ed.). CRC Press Inc., Boca Raton, FL.

Van Cleemput O.V., Samater A.H. 1996. Nitrite in soils: accumulation and role in the formation of gaseous N compounds. *Fertilizer Research*, 45: 81-89.

Wic C., Impacto ambiental de los tratamientos selvícolas e incendios en suelos forestales de la serranía de Cuenca. Propuesta de un índice de recuperación de calidad de suelo. Tesis. 248pp.

Wilkinson M., Crow P., Eaton E.L., Morison J. 2016. Effects of management thinning on CO₂ exchange by a plantation oak woodland in south-eastern England.

Zornoza R., Mataix-Solera J., Guerrero C., Arcenegui V., García-Orenes F., Mataix-Beneyto J., Morugán A. 2007. Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of the Total Environment*, 378: 233-237.