

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibersitate Publikoa

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS AGRÓNOMOS

NEKAZARITZAKO INGENIARIEN GOI  
MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA

# INFLUENCIA DE LAS ENTRADAS DE NUTRIENTES EN LAS PROPIEDDES FISICOQUÍMICAS DE SUELOS FORESTALES EN DOS BOSQUES MIXTOS DE LOS PIRINEOS NAVARROS.

MÁSTER EN AGROBIOLOGÍA AMBIENTAL

-

INGURUGIRO AGROBIOLOGIA MASTERRA

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**  
RAQUEL ECHEVERRÍA MUÑOZ

**DIRECTOR**

JUAN A. BLANCO VACA

**CODIRECTOR**

ANTONIO YESTE YESTE

DEPARTAMENTO CIENCIAS, UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA, CAMPUS DE ARROSADÍA  
S/N, PAMPLONA, 31006 NAVARRA, ESPAÑA



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

El Trabajo Fin de Estudios titulado:

Master amaierako lan hau:

Influencia de las entradas de nutrientes en las características fisicoquímicas de suelos forestales en dos bosques mixtos de los Pirineos navarros

Presentado por:

Nork aurkeztua:

RAQUEL ECHEVERRÍA MUÑOZ

Para optar al Máster en:

Master hau eskuratzeko:

AGROBIOLOGÍA AMBIENTAL

Ha sido realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra, en el Departamento de:

Nafarroako Unibertsitate Publikoko Nekazaritza Ingeniarien Goi Mailako Eskola Teknikoko sail honetan:

Ciencias

Bajo la dirección del Dr./Dra.

Noren zuzendaritzapean:

Juan Antonio Blanco Vaca

En Pamplona, el día:

Iruñean, egun honetan:

10 de junio de 2020

Fdo./Stua.:

Fdo./Stua.:

Raquel Echeverría Muñoz

Juan Antonio Blanco Vaca

Estudiante / ikaslea

Director/a / zuzendaria



## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer a Juan Blanco, director del trabajo, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, formar parte del equipo, y además de por su dedicación por las recomendaciones ofrecidas y por supuesto, por haber confiado en mí.

Agradecer a Antonio Yeste, codirector del trabajo, por su ayuda y paciencia inagotable.

Quiero destacar de ambos, los conocimientos transmitidos, motivación y su disponibilidad permanente durante todo el estudio además de en la novedosa y complicada situación actual sanitaria.

Agradecer también a los miembros del grupo de ecología en el trabajo realizado en el campo para la toma de muestras.

Muchas gracias a todas y a todos.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Los bosques</b> .....	<b>3</b>
1.1.1. Concepto .....	3
1.1.2. Importancia de los bosques.....	3
1.1.3. Bosques en España .....	4
1.1.4. Bosques en Navarra.....	5
<b>1.2. Silvicultura</b> .....	<b>7</b>
<b>1.3. Gestión forestal</b> .....	<b>7</b>
1.3.1. Legislación forestal .....	8
<b>1.4. El ciclo de nutrientes</b> .....	<b>8</b>
1.4.1. Ciclo externo.....	9
1.4.2. Ciclo interno .....	10
<b>1.5. El suelo forestal</b> .....	<b>12</b>
<b>1.6. Antecedentes y enmarcación del proyecto</b> .....	<b>13</b>
<b>1.7. Hipótesis de trabajo</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1. Descripción del área de estudio</b> .....	<b>17</b>
3.1.1. Localización .....	17
3.1.2. Meteorología y climatología .....	18
3.1.3. Geología .....	20
3.1.4. Características edafológicas.....	21
3.1.5. Vegetación.....	23
<b>3.2. Diseño experimental</b> .....	<b>25</b>
3.2.1. Implementación del experimento y parcelas de estudio .....	25
3.2.2. Factores de estudio de este trabajo .....	27
3.2.3. Método de campo .....	28
<b>3.3. Análisis de laboratorio</b> .....	<b>29</b>
3.3.1. Medida de pH .....	30
3.3.2. Medida de conductividad eléctrica .....	30
3.3.3. Contenido de materia orgánica .....	30
<b>3.4. Tratamiento de datos</b> .....	<b>31</b>
3.4.1. Gráficos.....	31
3.4.2. Análisis estadístico.....	31
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1. Resultados en función de la profundidad</b> .....	<b>33</b>
<b>4.2. Resultados del análisis estadístico</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3. Valores de pH del suelo</b> .....	<b>37</b>
4.3.1. Medida de pH en función del factor tipo de dosel en el análisis a nivel de especie. ....	37
4.3.2. Medida de pH en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización .....	38

<b>4.4.</b>	<b>Contenido de materia orgánica .....</b>	<b>39</b>
4.4.1.	Contenido de materia orgánica en función del factor tipo de dosel en el análisis a nivel de especie	39
4.4.2.	Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie	40
4.4.4.	Contenido de materia orgánica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización.....	42
4.4.5.	Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización.....	43
<b>4.5.</b>	<b>Conductividad eléctrica .....</b>	<b>44</b>
4.5.1.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie	44
4.5.2.	Medida de conductividad eléctrica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie.....	45
4.5.3.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización.....	46
4.5.4.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización.....	47
4.5.5.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor tratamiento en el análisis a nivel de localización.....	48
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1.</b>	<b>Profundidad .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2.</b>	<b>Medida de pH.....</b>	<b>50</b>
5.2.1.	Medida de pH en función del factor tipo de dosel en el análisis a nivel de especie .....	50
5.2.2.	Medida de pH en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización .....	50
<b>5.3.</b>	<b>Contenido de materia orgánica .....</b>	<b>51</b>
5.3.1.	Contenido de materia orgánica en función del factor tipo en el análisis a nivel de especie	52
5.3.2.	Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie	52
5.3.3.	Contenido de materia orgánica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie.....	53
5.3.4.	Contenido de materia orgánica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización.....	53
5.3.5.	Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización.....	54
<b>5.4.</b>	<b>Conductividad eléctrica .....</b>	<b>54</b>
5.4.1.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie	55
5.4.2.	Medida de conductividad eléctrica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie.....	55
5.4.3.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización.....	55
5.4.4.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización.....	56
5.4.5.	Medida de conductividad eléctrica en función del factor tratamiento en el análisis a nivel de localización.....	56
<b>6.</b>	<b>DISCUSIÓN GENERAL.....</b>	<b>57</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>60</b>

## RESUMEN

En este trabajo final de máster se han estudiado los efectos que han surgido en dos bosques del Pirineo navarro debido a la manipulación en la entrada de nutrientes al suelo.

Estos bosques están situados cerca de las localidades de Aspurz, Navascués y Garde, y en sus parcelas encontramos dos especies de arbolado predominante, pino (*Pinus sylvestris*) y haya (*Fagus sylvatica*), en Aspurz hay zonas de pino puro y dosel mixto, en Navascués hayedo puro y en Garde pinar puro.

El estudio en estas parcelas se remonta al año 1999 con diferentes estudios forestales en 9 parcelas donde se estudió la gestión forestal con la aplicación de diferentes porcentajes de clareo como tratamientos, hasta el año 2017 que se estableció el último y actual proyecto en el que se está trabajando.

El objetivo principal de este trabajo fue analizar los efectos producidos por la alteración de la entrada de nutrientes en el sistema forestal mediante fertilización y retirada de hojarasca sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo. Se analizó el pH, el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica. Además del tratamiento, también se tuvieron en cuenta distintos factores que pudieran influir en estas variables, como la localidad de las parcelas, el mes de muestreo y la profundidad.

Las diferencias entre variables en función del factor localidad fueron significativas en el pH, en el contenido de materia orgánica y en la conductividad eléctrica, siendo el factor más influyente en las propiedades fisicoquímicas de los suelos estudiados.

El tratamiento de fertilización únicamente generó diferencias en la conductividad eléctrica de los suelos de pino localizados en Aspurz y Garde.

No se han obtenido diferencias significativas en otras variables principalmente debido al escaso tiempo que se lleva aplicando este tratamiento, por lo que es completamente necesario seguir trabajando en el presente proyecto para poder observar que propiedades fisicoquímicas del suelo se ven alteradas.

PALABRAS CLAVE: propiedades fisicoquímicas, pino, haya, control, sin hojarasca, fertilizado, gestión forestal, ciclo de nutrientes.

## ABSTRACT

In this Master's Thesis study, the effects that have emerged in two forests of the Navarre Pyrenees have been studied due to the tampering of the input of nutrients into the soil. Those forests are located near to the villages of Aspurz, Navascués and Garde, where we find two different main species of pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). At the forests in Aspurz there are areas of pure pine and mixed canopy, at Navascués pure beech and pure pine in Garde.

The beginning of the study in these plots dates back to 1999, with different forestry studies since then in nine plots where forest management was studied with the application of different percentages of basal area removal as treatments, until 2017, when the last and current project in which this dissertation was carried out was established.

The main objective of this work were to analyze the effects produced because the variation of the input of nutrients in the forest system by fertilization and thinning out of fallen leaves over the physiochemical soil properties. The pH, the organic matter content and the electric conductivity in soils were analyzed. In addition to the treatment, different factors that could influence were taken into account as variables, such as the plots situation, the sampling month and the soil sampling depth.

The differences between variables depending the location factor were significant for the pH, the organic matter content and the electric conductivity. The last one was the most influential factor in the physiochemical properties at the studied soils.

The fertilization treatment just produced differences in the electric conductivity at the Aspurz and Garde soils. It did not produce significant differences in other variables mainly because there haven't been enough time since treatment implementation to cause significant changes. Therefore, it is completely necessary to keep working at the present project to understand what physiochemical soil properties could be disrupted by forest management practices.

KEYWORDS: Physiochemical properties, pine, beech, control, litterfall removal, fertilized, forest management, nutrients cycle.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Los bosques

### 1.1.1. Concepto

Según la RAE un bosque es “un sitio poblado de árboles y matas” (RAE, 2020), pero la FAO lo define como “la tierra que se extiende por más de 0,5 hectáreas dotadas de árboles de una altura a 5 metros y una cubierta de dosel superior 10%, o de árboles capaces de alcanzar esta altura in situ. No incluye la tierra sometida a un uso predominante agrícola o urbano (FAO, 2020).

Pero un bosque no es una simple extensión de terreno cubierta de árboles y matorrales, es algo más profundo, es un ecosistema complejo, imprescindible para la vida con una rica biocenosis (conjunto de seres vivos de diferentes especies que conviven y se desarrollan en un mismo biotopo, lugar que ofrece las condiciones ambientales apropiadas para la subsistencia del conjunto de seres vivos), en la cual se producen numerosas relaciones de equilibrio con los factores abióticos del medio. Por lo tanto, los bosques no son solo amplias extensiones de árboles, son un conjunto de procesos y de componentes que juntos crean el ecosistema forestal (Kimminis, 2003).

Los bosques se constituyen en los espacios más importantes de la biosfera terráquea. Conservar un bosque significa proteger su flora y su fauna y su aporte a la biodiversidad. Los bosques además fijan el dióxido de carbono mitigando el efecto invernadero y ayudan a luchar contra el cambio climático.

Son numerosos los tipos de bosques en función de la clasificación. Los bosques pueden clasificarse en 4 grandes grupos en función del clima y de la latitud, en lugares de abundantes precipitaciones aparecen los bosques tropicales (es en este tipo de bosque donde mas variedad de plantas y animales hay de la tierra), en zonas de climas húmedos o secos prevalecen los bosques subtropicales, los bosques boreales crecen y se desarrollan en zonas de temperaturas bajas todo el año y en lugares donde predomina un clima templado surgen los bosques templados que están sujetos a las cuatro estaciones del año.

Aunque los bosques son diferentes, comparten que tienen importantes funciones en la ecología y desafortunadamente muchos de ellos están bajo amenaza.

### 1.1.2. Importancia de los bosques

La biodiversidad forestal sustenta una amplia gama de bienes y servicios necesarios para el bienestar humano como recursos naturales (comida, agua, madera para construcción, bio-energía, piensos y plantas medicinales), polinización, abastecimiento y purificación del agua potable, protección contra los riesgos naturales (deslizamiento de tierra,



inundaciones, desprendimientos de rocas y avalanchas), captura y almacenamiento de carbono (Rodríguez *et al.*, 2016).

Uno de los mayores retos medioambientales a los que se enfrenta nuestra sociedad es el cambio climático, el cual está producido en gran medida por el aumento de los gases de efecto invernadero entre los que destaca el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Los bosques actúan como sumideros de carbono, ya que lo necesitan para llevar a cabo su función vital principal, la fotosíntesis. Extraen CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo almacenan en su madera, ramas, raíces y en el suelo (Castaño, 2011). Por lo que las especies vegetales formadoras de bosques representan una magnífica oportunidad para mitigar el cambio climático a través de la fijación de CO<sub>2</sub> (Castrillo, 2004).

Además, tienen una importante función porque proveen servicios ambientales regulando el agua, reduciendo la erosión, limpiando el aire y creando un microclima (Castaño, 2011).

### 1.1.3. Bosques en España

España es un país con una interesante variedad de climas, por lo que existe diversidad de plantas y masas vegetales. La mitad del territorio de España, aproximadamente, está catalogado como forestal y se caracteriza por ser potencialmente arbolado.

Los ecosistemas forestales de España ocupan algo más de veintiséis millones de hectáreas (26.280.281 ha), de las cuales casi quince millones (14.717.898 ha) están arboladas y unas doce (11.562.382 ha) desarboladas, que suponen respectivamente el 29% y el 23% del territorio nacional. Tienen parecida extensión los bosques de coníferas que los de frondosas (5,7 y 5,2 millones de hectáreas, respectivamente) mientras que los mixtos pueblan algo menos (3,9 millones de hectáreas) (MAPA, 2020).

Entre los árboles del grupo frondosas la especie con mayor presencia en cabida es la encina (*Quercus ilex*), seguida del roble negro o rebollo (*Quercus pyrenaica* y *Q. pubescens*), el eucalipto (*Eucalyptus spp.*) y el alcornoque (*Quercus suber*); en cantidad de pies mayores primero está la encina y después el rebollo, el haya (*Fagus sylvatica*), los quejigos (*Quercus faginea* y *Q. canariensis*), los robles (*Quercus robur* y *Q. petraea*) y los eucaliptos; y en biomasa arbórea la que más tiene es el haya, y a continuación la encina, los robles, los eucaliptos, el rebollo y el castaño (*Castanea sativa*) (MAPA, 2020).

En lo que respecta a las coníferas la especie de mayor ocupación territorial es el pino carrasco (*Pinus halepensis*), seguida de los pinos pinaster (*Pinus pinaster*), silvestre (*P. sylvestris*) y laricio (*P. nigra*); la de mayor cantidad el pino silvestre, continuando después el pino pinaster, el pino carrasco, el pino laricio y el pino insignis (*Pinus radiata*); y la de mayor biomasa arbórea el pino pinaster y luego están el silvestre, laricio, carrasco e insignis (MAPA, 2020).

#### 1.1.4. Bosques en Navarra

Los bosques en Navarra ocupan una gran parte de la superficie total, así pues, el 64% del territorio navarro es forestal y de esa superficie 450.000 hectáreas están cubiertas por árboles, y el resto por matorrales o pastizales. El 80% de estos bosques son autóctonos y en los últimos años la superficie arbolada en Navarra se ha incrementado en un 24%. Es de destacar también que en Navarra, los pastos, las formaciones arbustivas y de matorral también se consideran terreno forestal, a pesar de que la palabra “forestal” se asocia genéricamente con bosques y más concretamente con árboles en muchos países europeos (Gobierno de Navarra, 2020).

Navarra goza de una gran variedad climática, edáfica y orográfica que le brinda de una amplia diversidad forestal.

Los bosques de haya (*Fagus sylvatica*) son los más abundantes, abarcan 145.000 hectáreas lo que supone un tercio de las hayas totales de la Península Ibérica. Se sitúan en las zonas más altas del tercio norte, formando de este a oeste una masa de hayedos continua y solo interrumpida por los fondos de los valles, como es el caso de Navascués (figura 1)

En los valles del Roncal y Salazar, los bosques están compuestos principalmente por pino silvestre (*Pinus sylvestris*), como es en el caso de Garde (figura 2), además en zonas aparecen hayas o abetos formando masas mixtas, como en Aspurz (figura 3).

La zona noroccidental, muy húmeda, está poblada por bosques atlánticos mixtos, definido a su vez por repoblaciones de coníferas.

La zona media y sur de Navarra están caracterizadas por formaciones forestales de robledales mediterráneos, encinas y coscojas principalmente, y formaciones de matorral, algunas de ellas muy relevantes desde el punto de vista ecológico (Gobierno de Navarra, 2020).

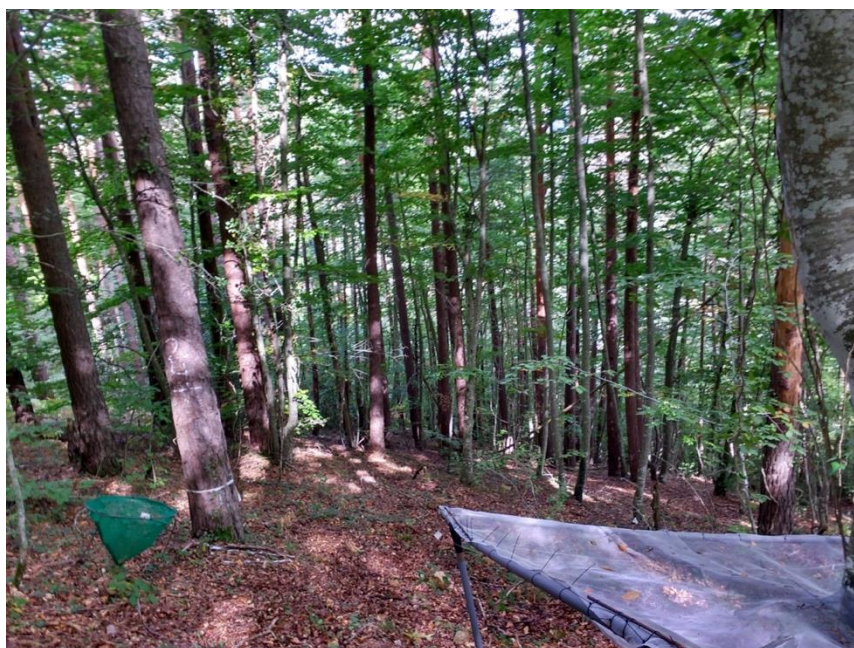


Figura 1: Bosque de hayas en Navascués.



Figura 2: Bosque de pinos en Garde.

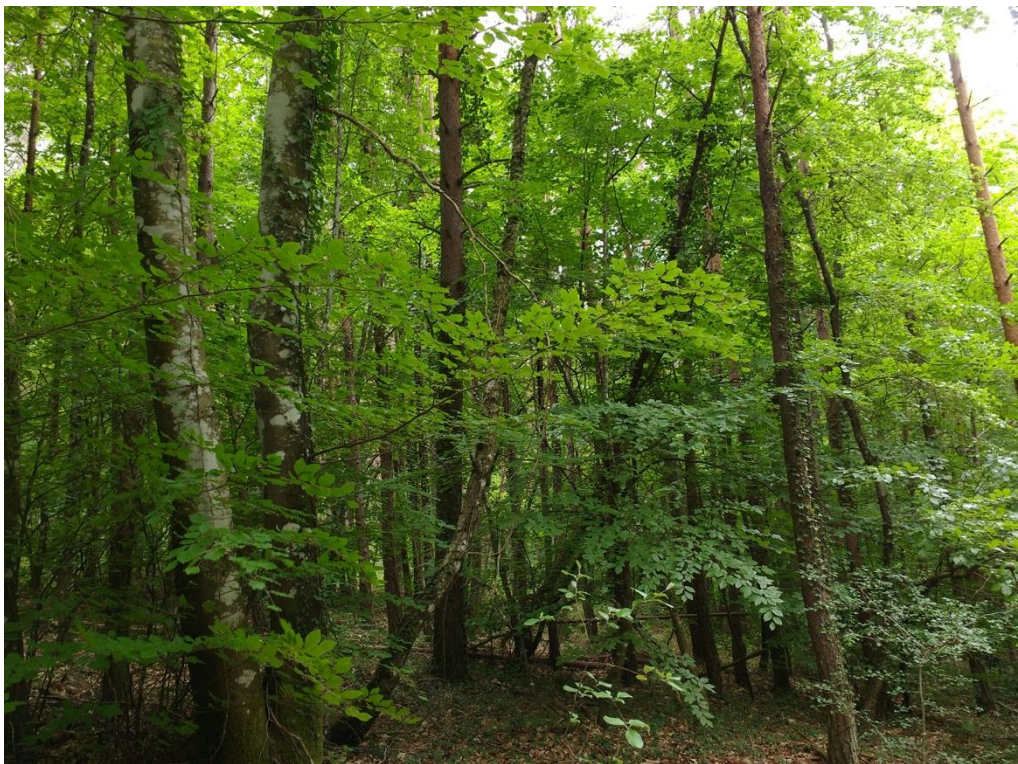


Figura 3: Bosque mixto de pinos y hayas en Aspuz.

## 1.2. Silvicultura

La silvicultura es una técnica que engloba numerosas prácticas dentro de la ecología forestal aplicada. La producción de madera no es su único objetivo a pesar de ser de gran importancia. La silvicultura trata de garantizar la presencia de la masa forestal y su calidad y además mantener los amplios beneficios que produce un bosque como son el agua, la fauna salvaje, los pastos, la caza, la recreación o la estética. En España, la silvicultura del pino silvestre se caracteriza por la búsqueda de la regeneración natural (Martínez *et al.*, 2008).

Los bosques son de relevancia ecológica ya que además de conformar hábitats para la subsistencia de especies de flora y fauna influyen enormemente en los ciclos del agua, sujeción del suelo y reduciendo los efectos de las inundaciones y el arrastre de materiales. Y sin olvidar de que son grandes sumideros de carbono, se estima que  $\frac{1}{4}$  parte de las emisiones generadas por el consumo de combustibles fósiles son retiradas del aire por la vegetación.

Y a pesar de los beneficios económicos obtenidos por la madera, que es un recurso natural, renovable, reciclable y biodegradable es necesario gestionar los bosques de manera sostenible.

Una de las técnicas más utilizadas en la silvicultura son las claras, que consisten en el desfronde de la masa principal arbórea cuando se encuentra en fase juvenil para disminuir la competencia entre árboles. De esta manera se estimula el crecimiento de los arboles que quedan y aumenta la producción de material utilizable de la masa (Blanco, 2004).

## 1.3. Gestión forestal

Durante años la práctica de tala forestal ha sido una de las principales actividades para comercializar la madera obtenida. Debido a la desaparición progresiva de los bosques por su explotación desenfrenada hubo que tomar conciencia antes de provocar un desastre ecológico.

La sostenibilidad en la gestión de los bosques es imprescindible para garantizar la persistencia de los mismos, ya que una explotación forestal no controlada puede provocar efectos irreversibles. Para que esto sea posible, hay que conocer qué factores de tipo social, económico, legal, técnico y ecológico pueden afectar al uso de los bosques.

Existen diversos instrumentos, como los proyectos de ordenación, que permiten a los propietarios planificar y programar adecuadamente los trabajos a realizar en sus montes, para que se pueda obtener una rentabilidad de éstos a la vez que garantizan la regeneración.

La gestión forestal puede ejercer un papel clave para ayudar a mitigar los esperados impactos del cambio global en los patrones de biodiversidad forestal (Gil-Tena, 2010).

Además, es necesario conocer los flujos de nutrientes en cada sistema forestal para anticipar cambios en el ecosistema, evaluar si determinadas prácticas forestales no son sostenibles y adaptar las técnicas forestales para conseguir los objetivos deseados conservando lo mejor posible el ecosistema (Imbert *et al.*, 2004).

### 1.3.1. Legislación forestal

La Política Forestal en España se desarrolla a través de un Programa Forestal tal y como se definió en el Panel Intergubernamental de Bosques de las Naciones Unidas en 1997, teniendo los objetivos principales de contribuir al desarrollo rural desde la actividad forestal manteniendo y mejorando el estado de conservación de los montes y su potencial económico (MAPA, 2020).

Los instrumentos legislativos parten de la Ley 43/2003, de 21 de noviembre de Montes y las leyes de montes aprobadas por las comunidades autónomas, así como el conjunto de normas que las desarrollan. Esta ley es modificada por la ley 10/2006, de 28 de abril, tiene carácter básico y sustituye a la anterior ley de 8 de junio de 1957 de montes para adaptarse a la nueva organización territorial del Estado (MAPA, 2020).

La Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes de la planificación forestal en España se articula, en diferentes escalas, en el plano estratégico a través de la Estrategia Forestal Española, el Plan Forestal Español, y los Planes Forestales Autonómicos y a nivel táctico los denominados Planes de Ordenación de los Recursos Forestales (PORF) cuyo contenido mínimo señala la ley 43/2003 de montes y son redactados y aprobados por las administraciones forestales de las Comunidades Autónomas (MAPA, 2020).

## 1.4. El ciclo de nutrientes

Las plantas y arboles se alimentan de nutrientes minerales para poder desarrollarse. Estos nutrientes pueden ser limitantes y no son estáticos, es decir, se distribuyen y fluyen en los ecosistemas por medio de diferentes procesos, lo que se denomina ciclo de nutrientes.

El ciclo de nutrientes es determinante en un ecosistema forestal, ya que un factor importante en el desarrollo de un bosque es su nutrición, por lo que se debe tener en cuenta para su manejo. La eficiencia en el ciclo de nutrientes en un bosque puede determinar su capacidad de permanencia a largo plazo (Blanco, 2004). Es importante conocer los flujos de energía, agua, carbono y nutrientes para conocer el funcionamiento de un ecosistema.

El movimiento de los nutrientes dentro de un ecosistema puede ser bidireccional, es decir, un ciclo externo (figura 4) para aquellos nutrientes que entran y salen del ecosistema debido a diferentes factores, como pueden ser factores climáticos y un ciclo

interno (figura 5) cuando el flujo de nutrientes es entre la planta y el suelo. En ambos ciclos, externo e interno, existen entradas y salidas de nutrientes.

#### 1.4.1. Ciclo externo

Los medios por los cuales los ecosistemas reciben nutrientes procedentes del exterior son diversos:

- La meteorización de la roca madre es la principal forma de suministro de nutrientes en muchos ecosistemas forestales. La rotura inicial de la roca madre y la degradación química posterior hacen que se vayan liberando poco a poco sus componentes, y estos pueden así ser transportados hacia los ecosistemas forestales (Blanco, 2004).
- Las entradas atmosféricas provienen de la deposición húmeda (lluvia, nieve y nieblas) y la deposición seca (partículas y aerosoles). La cantidad de aportes atmosféricos que llegan a los bosques depende principalmente del clima, microclima, y distancia con respecto al mar, áreas de erosión eólica y zonas industriales (Imbert *et al.*, 2004).
- Fijación biológica de nitrógeno, considerada como la mayor vía de entrada de nitrógeno al ecosistema. Las tasas anuales de fijación de nitrógeno son muy variables y oscilan entre cerca de 1 kg ha<sup>-1</sup> en bosques con fijadores libres, hasta más de 100 kg ha<sup>-1</sup> en bosques dominados por árboles en simbiosis con bacterias fijadoras (Imbert *et al.*, 2004).
- Transferencias por biota, aunque son raramente medidas pueden tener importancia en el balance de nutrientes de ecosistemas forestales. Pueden ser por heces y orinas de ganado, animales muertos y transporte de material vegetal por aves que viven en el bosque y otros ecosistemas colindantes (Imbert *et al.*, 2004).

Sin embargo, también existen procesos mediante los cuales se produce la salida de los nutrientes del ecosistema.

Estas salidas están provocadas principalmente por factores climáticos, por precipitaciones ya sea en forma de lluvia o nieve, provocando la salida de nutrientes por diferentes mecanismos:

- Escorrentía, cuando el suelo no es capaz de absorber el agua que cae y corre sobre la superficie del suelo (Blanco, 2004). La vegetación es uno de los principales factores en el control de la escorrentía (Puigdefábregas, 2001). Este proceso conlleva pérdidas importantes de nitratos y fósforo (Imbert *et al.*, 2004).
- Lixiviados, suele predominar las pérdidas de nitratos y nitrógeno orgánico disuelto. Estas salidas pueden dirigirse hacia aguas subterráneas (Imbert *et al.*, 2004).
- Pérdidas verticales de nutrientes por filtración, ocurre cuando el sustrato lo permite, el agua percola verticalmente por la fuerza de gravedad a través de los poros del suelo arrastrando nutrientes.

Otra causa importante de pérdida de nutrientes y que no tiene que ver con los mecanismos anteriores por la precipitación es la volatilización de nutrientes. La mayor parte de las pérdidas por estas condiciones se produce debido a quemas vegetales en las parcelas o a incendios. De forma semejante, los microorganismos del suelo pueden llevar procesos de desnitrificación en el que convierten amonio o nitratos en nitrógeno gaseoso que pasa a la atmosfera (Aspurz, 2015).

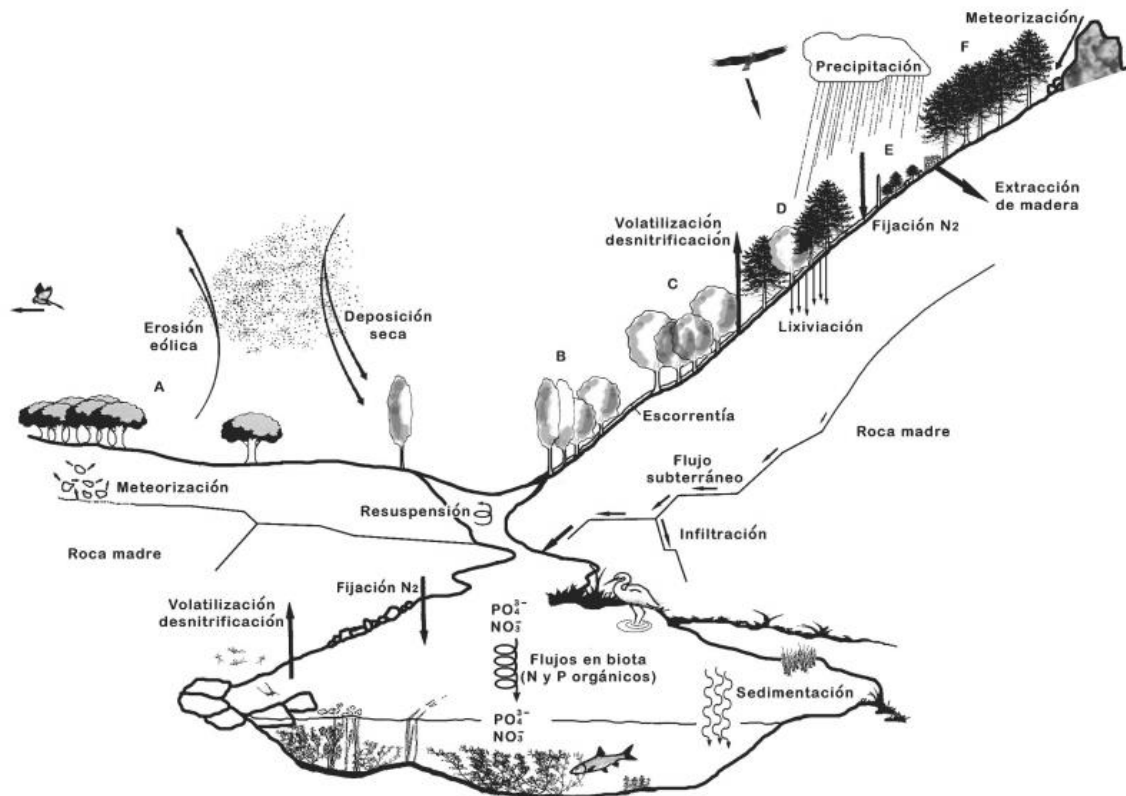


Figura 4: Esquema del ciclo externo de nutrientes en un bosque, formado por los nutrientes que entran y salen del ecosistema (Imbert *et al.*, 2004).

### 1.4.2. Ciclo interno

Se produce cuando el flujo de nutrientes es entre el suelo y la planta.

Las plantas reciben los nutrientes de diferentes maneras:

- Absorción radicular, las raíces de las plantas y árboles son capaces de tomar los nutrientes disponibles en el suelo, utilizando enzimas que facilitan el paso de los elementos minerales a través de la pared celular o por difusión a favor del gradiente de presión osmótica que exista en la rizosfera. Depende de la afinidad de las raíces por los diferentes nutrientes y sus concentraciones en la solución del suelo (Blanco, 2004).
- Retranslocación o reabsorción, es el proceso por el cual los árboles reabsorben parte de los nutrientes contenidos en sus hojas antes de la abscisión de éstas, considerándose como una especie de autorreciclaje de los nutrientes del árbol. Este mecanismo permite a los árboles cierta independencia respecto a la falta de nutrientes esenciales en el suelo (Blanco, 2004). La reabsorción supone un importante mecanismo de conservación de nutriente, en especial en el caso de

N y P, que son los nutrientes más limitantes en ecosistemas terrestres (Gallardo *et al.*, 2009).

Y al contrario ocurre cuando es el suelo el que recibe los nutrientes desde la planta:

- Desfronde, la caída de la hojarasca constituye uno de los procesos principales de transferencia de nutrientes al suelo (Gallardo *et al.*, 2009). El material vegetal se acumula en el mantillo del suelo para una posterior descomposición. Más del 90% del N y del P que absorben las plantas vienen del desfronde originado el año anterior (Chapin *et al.*, 2002). La tala de árboles puede alterar este proceso, debido a que al reducir parte del dosel arbóreo disminuye la caída de hojarasca y el retorno de nutrientes al suelo.
- Descomposición, es el proceso de transformación de la materia orgánica muerta procedente del desfronde, raíces, animales y microorganismos, en nutrientes inorgánicos directamente disponibles para las plantas. En este proceso se produce la liberación a la atmósfera del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) debido a la respiración de los organismos descomponedores (Imbert *et al.*, 2004).
- Otras pérdidas pueden deberse al pluviolavado, el agua de lluvia al caer sobre la vegetación arrastra los minerales depositados en las hojas y en el tronco y los transporta hasta el suelo como translocación o escorrentía cortical (Gallardo *et al.*, 2009). Supone el 15% de retorno anual de nutrientes de la biomasa vegetal aérea al suelo (Imbert *et al.*, 2004). Otro escape de nutrientes se produce a través de herbívoros que son capaces de acabar entre el 1% y un 50% de la producción vegetal en función de la especie, aunque estos nutrientes pueden volver al medio a través de las heces, pero parte se pierden por volatilización (Chapin *et al.*, 2002).

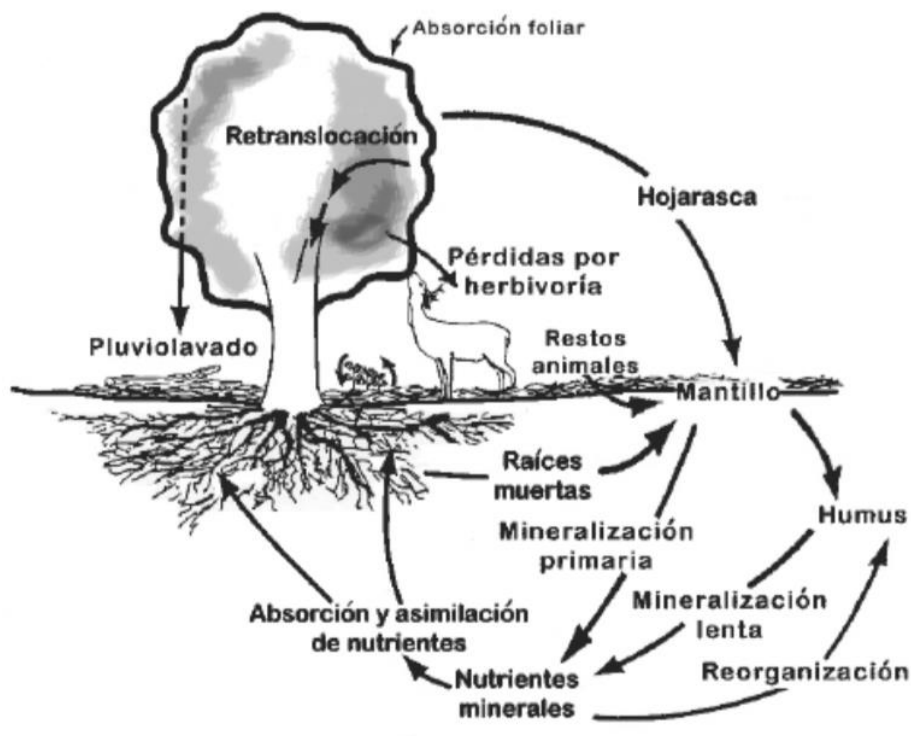


Figura 5: Esquema del ciclo interno de nutrientes en un bosque, formado por el flujo de nutrientes entre la planta y el suelo (Imbert *et al.*, 2004).



## 1.5. El suelo forestal

El suelo se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales, de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. Es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano); de materiales parentales (rocas y minerales originarios) (FAO, 2020). Es un recurso natural degradable y no renovable a corto plazo, su velocidad de formación y regeneración es muy lenta. En cambio, los procesos que influyen en la degradación y destrucción son mucho más rápidos (Amorós *et al.*, 2015).

Pero los suelos forestales no engloban los suelos agrícolas que son diferentes, no solo por las diferentes comunidades vegetales que sustentan, sino por la presencia de una capa orgánica que se acumula sobre el suelo mineral, el mantillo (Perry *et al.*, 2008).

La calidad del suelo es un factor determinante en el manejo forestal sostenible. La calidad del suelo incluye una medida de la capacidad del suelo para producir biomasa vegetal, mantener la salud y la producción animal, reciclar nutrientes, almacenar carbono, repartir lluvia, amortiguar la acidez antropogénica, remediar los desechos animales y humanos añadidos y regular las transformaciones de energía (Schoenholtz *et al.*, 2000):

Son numerosas las propiedades que indican la calidad de un suelo, a continuación, se describen las estudiadas a lo largo del presente trabajo:

- pH

Es una medida de acidez o alcalinidad en el suelo, su rango de valores es de 0 – 14. Valores de pH inferiores a 7 indican que el suelo es ácido, tiene mayor concentración de  $H^+$ , cuando un suelo tiene la misma concentración de  $H^+$  y  $OH^+$  el pH del suelo es 7, es neutro, en cambio valores superiores a 7 indican que el pH del suelo es básico, que tiene alta concentración de  $OH^+$ .

Es una de las propiedades fisicoquímicas más importante en los suelos, ya que de él depende la disponibilidad de nutrientes para las plantas, determinando su solubilidad y la actividad de los microorganismos, los cuales mineralizan la materia orgánica (Ramírez, 1997). En suelos con pH ácido, el hierro, magnesio, cobre y zinc son altamente disponibles. En cambio, otros nutrientes como el calcio, magnesio y el fósforo están disponibles a pH básico; el rango de valores de pH que proporciona mejores condiciones de asimilabilidad de nutrientes son ligeramente ácidos (Ginés *et al.*, 2005)

- Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo. Su valor es proporcional a la cantidad de sales en solución que contiene el suelo.

Esta variable está muy ligada a la presión osmótica de la solución del suelo, por lo que cuanto mayor sea la presión osmótica, mayor es el esfuerzo que tienen que realizar las raíces de las plantas para obtener agua (Resano, 2018).

Si la concentración de sales es muy elevada puede producir toxicidad y si las sales son de sodio (Na) además pueden destruir la estructura del suelo (Báscones, 2005).

- Materia orgánica

La materia orgánica es una capa que aparece en la superficie del suelo natural está constituida por una mezcla de microorganismos y restos vegetales y animales, en diferente grado de descomposición (Báscones, 2005). El contenido de materia orgánica en el perfil del suelo disminuye potencialmente con la profundidad.

En los suelos forestales, la materia orgánica aportada a la superficie del suelo (hojarasca, ramas, restos vegetales, deyecciones, etc) forma el mantillo (Porta *et al.*, 2003). En los suelos agrícolas, la materia orgánica suele representar entre el 1 – 3% de los constituyentes del suelo, mientras que en suelos forestales, este porcentaje puede elevarse mucho más (López, 2005).

## 1.6. Antecedentes y enmarcación del proyecto

Navarra es una comunidad autónoma que posee una variada vegetación, este es el resultado de la variabilidad de diversos factores bioclimáticos, edáficos y topográficos. Es una de las regiones con mayor superficie forestal. Es una comunidad en la que la práctica de la tala forestal era una de las bases económicas de diversas regiones. La especie estrella la cual se talaba para la producción de madera era el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y para promover su crecimiento se talaban las especies de haya (*Fagus sylvatica*) las cuales eran muy abundantes en la zona y se así evitaba la competencia. También se seguía plantando pino. Actualmente la abundancia y presencia de hayas en Navarra sigue predominando.

El mantenimiento del haya en el sotobosque cada vez está más promovido debido a que los bosques mixtos tienen múltiples beneficios, mayor biodiversidad, mayor resistencia frente a enfermedades y frente a estrés abiótico (Primicia, 2013). El cambio climático tendría un impacto relativamente menor en zonas de bosque mixto propensos a la sequía (González *et al.*, 2016).

Por estos motivos la Universidad Pública de Navarra (UPNA) mostró su interés en el estudio del funcionamiento de los bosques navarros y la gestión silvícola de las masas naturales de pino, por lo que el grupo de Ecología y Medio Ambiente lleva investigando estos bosques desde hace 20 años.

Este proyecto “Estudio y construcción de Tablas de Producción de Selvicultura de referencia para masas regulares de regeneración natural de *Pinus Sylvestris* L., en la Comunidad Foral de Navarra” (Proyecto SC96-078) se inició junto con el Gobierno de Navarra que estableció dos ensayos de diferentes intensidades de clareo en masas de pinos silvestre (*Pinus sylvestris*) en dos localidades situadas en el pirineo navarro: Aspurz

y Garde. Un bosque mixto de pino silvestre y frondosas en mayor parte por hayas en Aspurz y un bosque puro de pino en Garde. Actualmente el bosque de Garde se sigue considerando como un pinar puro debido a la predominancia de pino silvestre, en cambio el bosque de Aspurz clasificado a principios de las investigaciones como una zona de pinar mixto dominada por pino silvestre podría dejar de serlo ya que hoy en día existen amplios parches que se pueden considerar zonas mixtas en las que la cobertura de haya se ha expandido hasta codominar el estrato arbóreo.

En el año 1999 se aplicaron los primeros clareos de diferentes intensidades (0%, 20% y 30%) en ambas localidades ya mencionadas. El objetivo inicial era determinar si la aplicación de los clareos optimizaba la utilidad global del sistema forestal.

Se encontró la posibilidad de llevar a cabo otras investigaciones sobre el funcionamiento y estructura de estos dos bosques. Se creó un modelo de simulación de nutrientes que permitió estimar los límites para que una gestión forestal sea sostenible. Se mostró como ambos bosques funcionaban de manera diferente y por ello la gestión forestal debía ser diferentes (Blanco, 2004).

Basándose en mapas e inventarios florísticos de zonas puras (pino silvestre) y zonas mixtas (pino y haya) realizados en el bosque de Aspurz en 2003 y 2008, se observó que la cobertura de haya se expandía rápidamente ya que son especies muy competitivas y son capaces de sobrevivir en ambientes oscuros. Ambas especies tienen estructura y funciones diferentes por lo que, según el tipo de árbol dominante de cada área, los flujos de agua y de nutrientes y por lo tanto el crecimiento de los árboles variaban. Es importante un conocimiento sólido del ecosistema en bosques mixtos (Primicia, 2013) en vez de tener una visión individual de especie. En 2009 se realizó en Aspurz un segundo clareo con intensidades de clara de 0%, 20% y 40%.

En el año 2013 se centraron los esfuerzos en analizar cambios globales como el cambio climático o el cambio en los usos y gestión de los montes y predecir como los bosques de Garde y Aspurz pueden verse afectados. La circulación de nutrientes en los pinares de pino silvestre se ve afectada de distinta forma en función de las condiciones biogeoclimáticas y del tipo de gestión por lo que pueden responder al cambio climático (Blanco *et al.*, 2015).

Años después en el 2017 el grupo de Ecología y Medio Ambiente desarrolló un nuevo proyecto en estas parcelas, Project AGL2016 – 76463 – P - TIMENUTRIENT, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad en el cual se engloban las actividades realizadas. Un experimento de manipulación de los nutrientes en las localidades de ensayo, Aspurz y Navascués como una extensión de Aspurz al ser un hayedo más desarrollado y Garde, para estimar cronologías del ciclo de nutrientes a nivel de rodal y desarrollar herramientas que apoyen la gestión forestal innovadora para condiciones futuras inciertas

El presente TFM supone una parte de estudio y por lo tanto un aporte de información de este proyecto TIMENUTRIENT.

## 1.7. Hipótesis de trabajo

Los principales factores que afectan a las características de un suelo forestal son los rasgos geológicos, su climatología, el perfil edafológico y la vegetación, además de influir la gestión forestal.

Por lo tanto, se espera que las características fisicoquímicas de los bosques estudiados difieran entre sí. En concreto, la hipótesis inicial es que las propiedades químicas analizadas (pH, conductividad eléctrica y materia orgánica) en los suelos de las diferentes parcelas donde se ha realizado el estudio sean significativamente diferentes en función de:

1. Los diferentes tratamientos aplicados que modifican el ciclo de nutrientes (fertilización, retirada de hojarasca).
2. El carácter local (características topográficas y edáficas).
3. El tipo de especie dominante (conífera, frondosa o dosel mixto).

## 2. OBJETIVOS

Este presente trabajo forma parte del proyecto “AGL2016 – 76463 – P – TIMENUTRIENT”, cuyo objetivo global es desarrollar una metodología que permita reconstruir los flujos de nutrientes durante la vida de un bosque y así poder estimar los posibles cambios futuros en esos ciclos de nutrientes. De esta forma, el objetivo general es aumentar el conocimiento sobre el efecto de los ciclos de nutrientes en el crecimiento de masas arbóreas mixtas de pino silvestre o albar (*Pinus sylvestris*) y haya (*Fagus sylvatica*) en los Pirineos de Navarra a medio y largo plazo. Una parte importante de dicho proyecto es el análisis de las relaciones entre entradas de nutrientes al suelo forestal y las características fisicoquímicas del mismo. En esta actividad específica del proyecto TIMENUTRIENT se encuadra el trabajo presentado en este Trabajo de Fin de Máster.

Por tanto, para conseguir el objetivo general del proyecto global, se presenta este trabajo de fin de máster en el cual se han conseguido llevar a cabo diferentes objetivos propuestos previamente:

- Determinar si existe variación en las variables fisicoquímicas monitoreadas (pH, contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica) debido al efecto de la profundidad (0-13 cm y 13-26 cm) a la cual se ha hecho la toma de muestras para las variables medidas.
- Determinar si la composición de las diferentes masas arbóreas estudiadas (pino puro, pino mixto, haya mixto y haya puro) afectan significativamente a las variables edáficas estudiadas.
- Determinar si el factor sitio (Aspurz y Garde) afecta a las medidas de pH, conductividad eléctrica y materia orgánica de las muestras de suelo recogidas en zonas de pinares puros.
- Determinar si la manipulación de las entradas de nutrientes de forma experimental (fertilización y retirada de hojarasca) sobre el suelo en el cual crecen estas especies, puede hacer que los resultados de pH, conductividad eléctrica y materia orgánica sean diferentes en función del tratamiento aplicado.
- Determinar si existe un efecto temporal sobre las variables en función del mes en el que se recogieron las muestras en las distintas parcelas.
- Determinar si existe variación de los contenidos de nutrientes en estos suelos y ver si los resultados de este estudio siguen una tendencia similar a resultados obtenidos en otros estudios anteriores.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción del área de estudio

##### 3.1.1. Localización

Este estudio se ha realizado en los municipios de Navascués, en concreto en los concejos de Aspuz y Navascués y en el municipio de Garde (figura 6).

Están situados al Noreste de Navarra, pertenecientes a los Valles Transversales Pirenaicos.

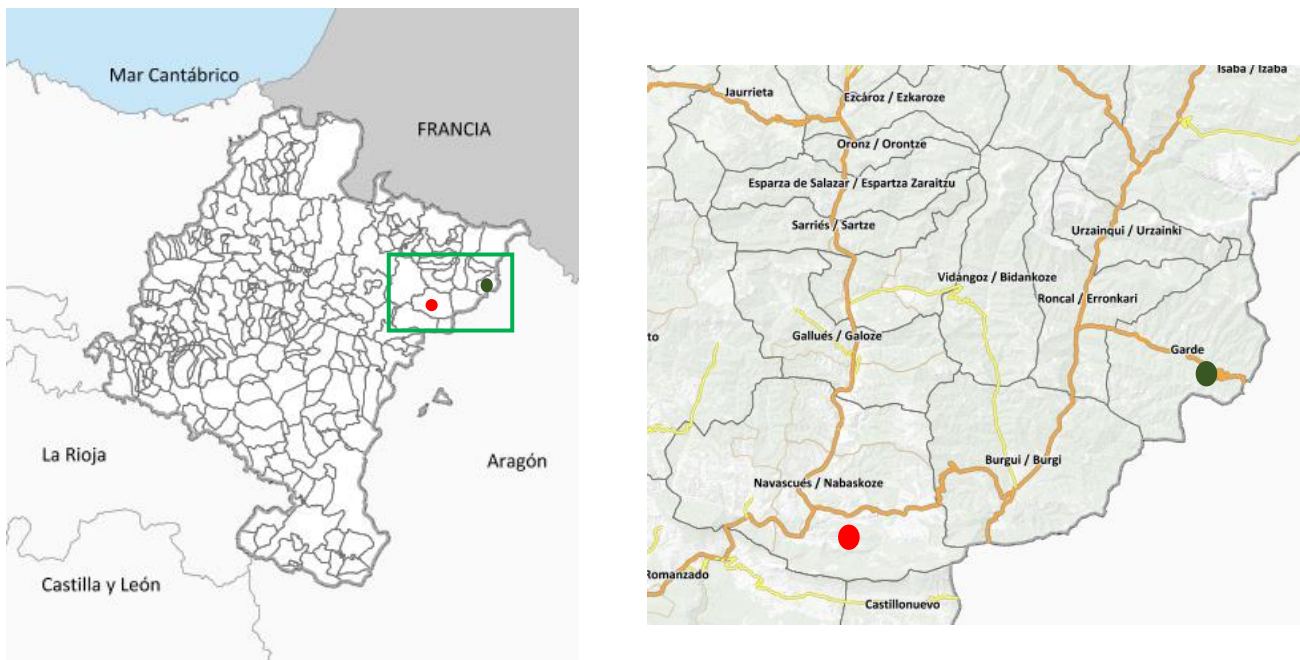


Figura 6: Mapa de localización de los sitios de ensayo. (Fuente: IDENA 2020)

Las muestras fueron recogidas en las parcelas de Aspuz, pueblo que pertenece administrativamente al Municipio de Navascués y al Partido Judicial de Aoiz, geográficamente en la zona del Almiradío de Navascués. Estas muestras fueron tomadas concretamente en el paraje de “La Sierra” ubicadas en el monte de Arriba, Abajo e Idocorri, nº 168, 169 y 171 del Catálogo de Utilidad Pública (C.U.P) de Navarra, ( $41^{\circ} 41' 31''$  N,  $1^{\circ} 08' 40''$  W), también se tomaron muestras en la zona del concejo de Navascués ( $42^{\circ} 41' 43,2''$  N,  $1^{\circ} 06' 37,5''$  W).

Las parcelas de Aspuz están situadas a 620 metros de altitud media y tienen una pendiente media del 20%. Las parcelas de Navascués están situadas en el mismo macizo montañoso y tienen orientación semejante, pero están ubicadas a 850 m de altura media y con una pendiente media del 55%. Ambas parcelas están orientadas al NO

Las parcelas de Garde en las cuales se extrajeron el resto de las muestras están situadas en el paraje “Krutxillaga” ( $42^{\circ} 48' 50''$  N,  $00^{\circ} 52' 30''$  W), que pertenece

administrativamente al Municipio de Garde y al Partido Judicial de Aoiz, geográficamente en el Valle del Roncal ubicadas en el Catálogo de Utilidad Pública (C.U.P) de Navarra en el nº 115.

Las parcelas de Garde están situadas a una altura media de 1335 metros y tienen una pendiente media del 40%. Esta parcela está orientada al N.

### 3.1.2. Meteorología y climatología

Una de las principales características del clima en el territorio navarro, es sin duda, la variedad y la riqueza de matices climáticos, originando una gran variedad ecológica, paisajística y de ocupación de los terrenos. Se han consultado los datos históricos climáticos hasta el año 2018 incluido, de las dos estaciones meteorológicas más próximas a las parcelas de estudio para poder evaluar el posible impacto de las condiciones climáticas.

Los datos climatológicos de Aspurz y Navascués quedan recogidos en la estación meteorológica situada en Navascués y quedan representados en el siguiente diagrama ombrotérmico (Figura 7).

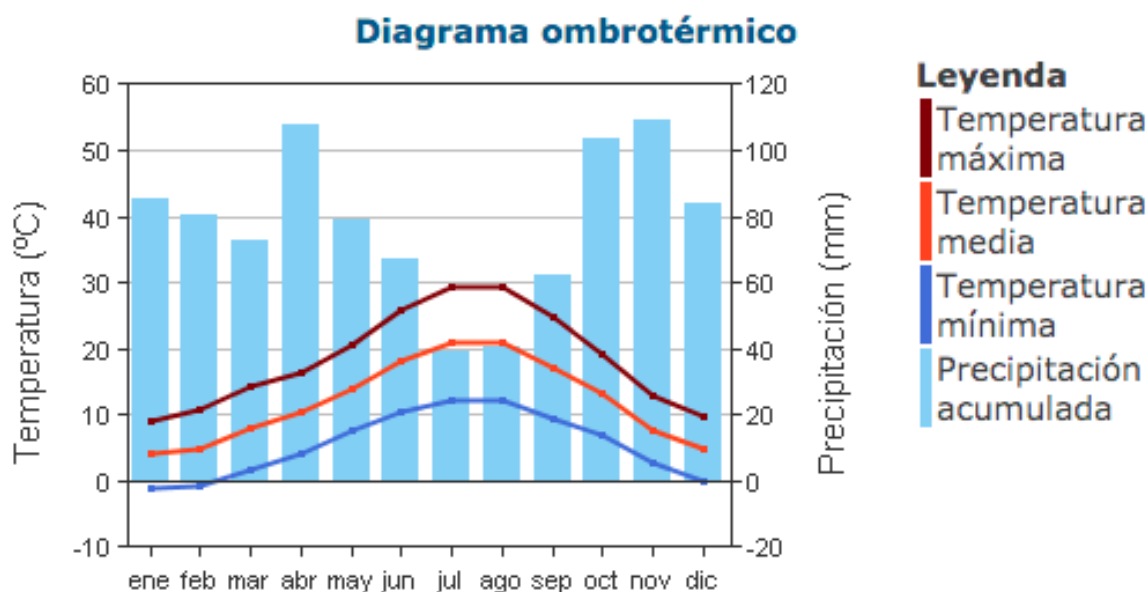


Figura 7: Diagrama ombrotérmico de la estación meteorológica de Navascués. (Fuente: MeteoNavarra 2020)

En esta zona se ha registrado una precipitación media anual de 929,9 mm y una temperatura media anual de 12 °C, (Meteo Navarra, 2020). Los meses de julio y agosto son lo más calurosos pudiendo alcanzar temperaturas de 30°C, aunque con temperaturas mínimas de menos de 15°C, estos meses también son los menos lluviosos con precipitaciones de 40 mm mensuales. Los meses más fríos corresponden a diciembre, enero y febrero con temperaturas mínimas por debajo de los 0°C. Abril y noviembre son los meses en los que hay una mayor precipitación con mas de 100 mm mensuales.

Con estos valores climatológicos y siguiendo la clasificación climática de Papadakis, se corresponde a un clima mediterráneo marítimo fresco.

Garde no cuenta con una estación meteorología propia, por lo que se han utilizado los datos recogidos en la estación meteorológica de la localidad de Urzainqui (figura 8), ya que es la estación más cercana a las parcelas de estudio de Garde. Además de la diferencia de distancia entre ambos lugares cabe destacar la diferente altitud, ya que las parcelas de estudio de la zona de Garde se encuentran a 1.335 m y la localidad de Urzainqui donde se encuentra la estación meteorológica está a 722 m de altitud, por lo que hay que tener en cuenta los 613 m de altitud de diferencia.

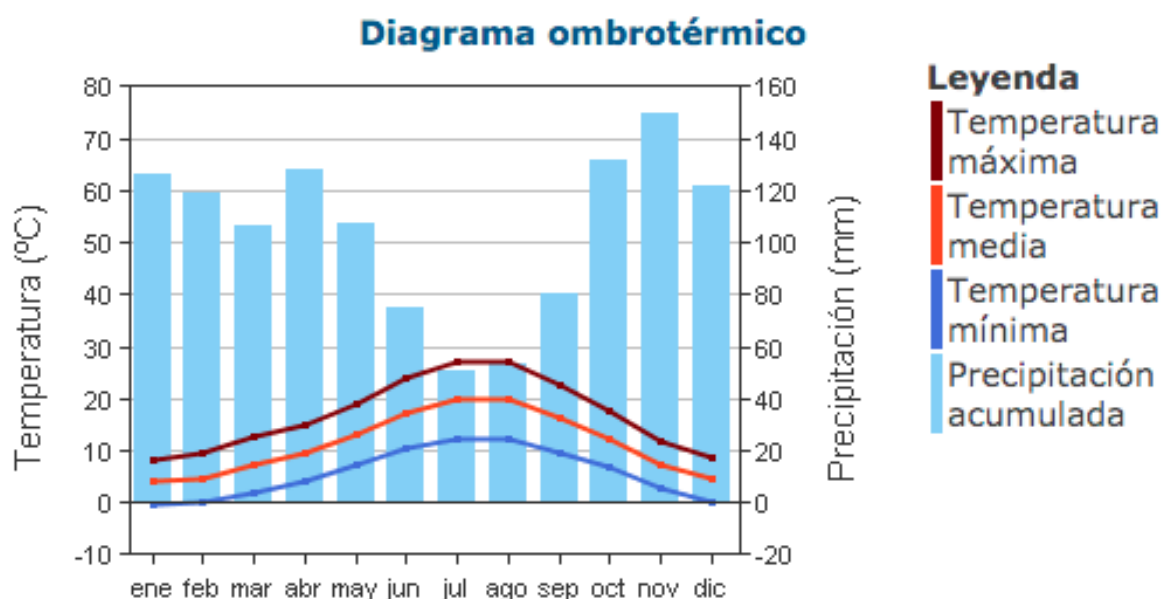


Figura 8: Diagrama ombrotérmico de la estación meteorológica de Urzainqui. (Fuente: MeteoNavarra 2020).

En esta zona se ha registrado una precipitación media anual de 1.250 mm y la temperatura media anual registrada es de 11,3 °C, (Meteo Navarra, 2020). Los meses más calurosos también son los meses de julio y agosto, con temperaturas máximas de casi 30 °C pero con temperaturas mínimas de 10 °C. Estos meses son los meses en los que se registra la menor precipitación, alrededor de 50 mm mensuales. Diciembre, enero y febrero siguen siendo los meses mas fríos con temperaturas mínimas de 0°C. Los meses con mayor precipitación acumulada son los meses de abril y noviembre entre los 130-150 mm mensuales.

En esta zona el tipo del clima según la clasificación climática de Papadakis también se corresponde a un clima mediterráneo marítimo fresco, aunque limita con un clima continental oceánico, ya que las parcelas están a mayor altura que la estación meteorológica de la cual se recogen los datos.

Con ambos diagramas (figuras 7 y 8) se observan que los meses de julio y agosto además de ser los más calurosos son los más secos respecto al resto, así como abril y noviembre corresponden con ser los más húmedos y lo meses más fríos son diciembre, enero y febrero.



Las temperaturas son similares en ambas estaciones, pero hay que tener en cuenta como se ha comentado anteriormente la diferente altitud a la cual esta situada la estación de Urzainqui y la situación real de las parcelas de Garde, por lo que los rasgos climáticos varían. Sabemos que en la zona de estudio las temperaturas ambientales son inferiores y la pluviometría mayor respecto a la media de la estación de Urzainqui. Por esto, se aplicó un factor de corrección, que se basa en reducir 1°C la temperatura por cada 150 metros ascendidos. Teniendo en cuenta que la diferencia de altitud entre la estación meteorológica y las parcelas experimentales es de 613 metros, la temperatura media anual en Garde es 4,08 °C menos que la registrada en la estación meteorológica de Urzainqui.

Se observa como en la zona de Aspuz las precipitaciones son más reducidas y las temperaturas un poco más elevadas a diferencia de Garde donde llueve más y hace más frío. A continuación, se recogen los datos climáticos reales de las parcelas de estudio (tabla 1):

Tabla 1: Datos promedios de las parcelas de estudio

Localidad	Coordenadas	Orientación	Pendiente (%)	Altitud (m)	Pluviometría (mm)	Tm (°C)
Aspuz	41°41'31"N, 1°08'40" W	NO	20	620	929,9	12
Navascués	42°41'43,2"N, 1°06'37,5"W	NO	55	850	929,9	12
Garde	42° 48' 50" N, 00° 52' 30" W	N	40	1335	1250	7,22

### 3.1.3. Geología

En este aspecto, Navarra también es muy variada ya que representa todas las épocas geológicas, desde el Ordovícico hasta la actualidad. Las parcelas destinadas a estudio están situadas en la zona pirenaica de Navarra, que comprende la parte nororiental de Navarra.

Las parcelas de Garde están asentadas sobre una roca madre formada por flysch (un sedimento marino integrado por alternancia entre sí de estratos poco espesos de arcillas o margas y de areniscas) del Terciario, Eoceno medio, Luteciense medio (Blanco, 2004).

Las parcelas de Aspuz se encuentran sobre calizas del Terciario, Eoceno inferior llerdiense. Lo representan en las sierras de Illón y Leire calcarenitas de biofacies nerítica correspondiente a la zona interior de la plataforma. En ambas sierras forman las extensas áreas calizas que destacan en el relieve formando frecuentemente superficies estructurales. Se caracterizan por la abundancia de alveolinas, que permiten diferenciarlas de las calizas de Thanetiense (Blanco, 2004).

### 3.1.4. Características edafológicas

El suelo es un medio natural y dinámico cambiante respecto al tiempo y al espacio. Es considerado como un sistema abierto que presenta intercambios de materia y energía con el medio en donde se desarrollan diversos procesos fisicoquímicos y biológicos, que serán los responsables de su morfología y propiedades (Zúñiga, 1999).

A continuación, se presentan los análisis edafológicos de las parcelas de estudio, en los que se describen los horizontes del perfil del suelo y sus características fisicoquímicas.

Las parcelas de Aspurz y Navascués corresponden a un régimen de humedad de dicho suelo Údico y al régimen térmico de tipo Mésico. Según la clasificación USDA el suelo es un Hapludalf lítico, y según FAO un Alisol háplico. Este perfil se ha desarrollado sobre roca madre de flysch y se han considerado diferentes horizontes.

El primer horizonte del perfil, horizonte A, consta de 10 cm de espesor, y es de color pardo. Es el horizonte superficial y al tener un espesor menor de 10 cm se clasifica como un Epipedón Ochrico. Por debajo de este se encuentra un horizonte B mineral subsuperficial, argílico, de acumulación de arcilla iluvial de color pardo claro, cuyo límite se encuentra a 45 cm de profundidad (10 – 45 cm). A partir de los 45 cm, se encuentra roca (horizonte R) de arenisca perteneciente al flysch y su límite inferior se desconoce (Blanco, 2004).

En la tabla de a continuación (Tabla 2) viene recogida la descripción de los horizontes de perfil de este suelo, su textura y estructura. En este estudio las muestras que se han recogido corresponderían a los horizontes A y B ya que las muestras se cogieron a profundidad 0 – 13 cm y 13 – 26 cm.

Tabla 2: Descripción y características del suelo de las parcelas de Aspurz, (Blanco, 2004)

Horizonte	Profundidad	Descripción
<b>A</b>	0 – 10	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR2/2) y en seco pardo claro (7,5YR5/3). Estructura granular, moderada, fina y muy fina. Textura franco arenosa. Abundantes raíces de muy diversos tamaños. Algún signo de actividad biológica, canales, micelio de hongos, etc. Límite gradual. Posee un 52,26% de arenas, un 40,51% de limos y un 7,23% de arcillas, según USDA.
<b>B</b>	10 – 45	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR4/4), en seco pardo claro (7,5YR5/3). Estructura en bloques, poliédrica subangular, débil, media rompiendo en fina y muy fina. Textura franco arenosa. Cutanes de iluviación en las caras de los agregados. Menos raíces que en el horizonte superior pero mas gruesas. Escasa actividad biológica. Límite brusco. Posee un 55,48% de arenas, un 33,28% de limos y un 14,24% de arcillas, según USDA.
<b>R</b>	45 –	Alternancia de arcillas y areniscas.

El análisis edafológico de las parcelas de Garde determina que el régimen de humedad de dicho suelo es Údico y el régimen térmico es Mésico. Según la USDA es un Dystrudept típico y según la FAO corresponde con un Cambisol dístrico. Este suelo se ha desarrollado sobre una roca madre de flysch.

El primer horizonte del perfil, es el horizonte A que tiene un espesor de 15 cm (0 – 15 cm), en el que se da la incorporación de material orgánico humificado, con un color pardo. Debajo de éste aparece el horizonte B mineral subsuperficial cuyo límite alcanza los 35 cm de profundidad (15 – 35 cm) y tiene un color pardo. Este horizonte B descansa sobre un horizonte C el cual está formado por elementos de la roca madre alterada que llega hasta los 60 cm de profundidad (35 – 60 cm), es de color pardo al igual que los dos horizontes anteriores. A partir de esta profundidad se encuentra la roca madre, una roca arenisca que forma parte de una capa de las que compone el flysch, el límite inferior de este último horizonte del perfil se desconoce (Blanco, 2004).

En la tabla siguiente (Tabla 3) viene recogida la descripción de los horizontes de perfil de este suelo, su textura y estructura. En este estudio las muestras que se han recogido corresponden a los horizontes A y B ya que las muestras se cogieron a profundidad 0 – 13 cm y 13 – 26 cm.

Tabla 3: Descripción y características del suelo de las parcelas de Garde, (Blanco, 2004)

Horizonte	Profundidad	Descripción
<b>A</b>	0 – 15	Color en húmedo pardo oscuro (10YR3/3) y en seco pardo (10YR5/3). Estructura granular, fuerte y fina. Textura franca. Ocasionales cantos de arenisca. Algún canal de actividad biológica. Abundante cantidad de raíces de todos los tamaños. Límite gradual. Posee un 45,83% de arenas, un 30,87% de limos y un 23,30% de arcillas, según USDA.
<b>B</b>	15 – 35	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR3/6), en seco pardo (7,5YR5/3). Estructura en bloques, poliédrica subangular fuerte, de media a fina. Textura franco arcillosa. Cutanes de iluviación en las caras de los agregados. Frecuentes raíces muy finas y alguna gruesa. Cantos de arenisca más abundantes que en el horizonte anterior, muchos de ellos fuertemente alterados, se rompen fácilmente. Galerías gruesas y muy gruesas que corresponden a raíces muertas. Límite claro. Posee un 39,40% de arenas, un 34,88% de limos y un 25,72% de arcillas, según USDA.
<b>C</b>	35 – 60	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR3/4) y pardo amarillento claro (10YR6/4) en seco. Sin estructura aparente. Muy abundantes cantos de arenisca parcialmente alterados. Textura franco arcillosa. Libre prácticamente de raíces. Límite neto y ondulado. Posee un 41,82% de arenas, un 31,66% de limos y un 26,52% de arcillas, según USDA.
<b>R</b>	60 -	Alternancia de arcillas y areniscas.

### 3.1.5. Vegetación

La comunidad de Navarra por las condiciones geográficas, climáticas y geológicas en las que se enmarca presenta una variada vegetación (figura 9).

Las localidades de Aspuz, Navascués y Garde pertenecen a los valles pirenaicos navarros, en donde sus masas arbóreas se caracterizan por ser bosques caducifolios dominados por hayas (*Fagus sylvatica*) acompañadas por pino silvestre o albar (*Pinus sylvestris*) y abetos (*Abies alba*), y por bosques de especies perennes en los cuales dominan el abeto (*Abies alba*), el pino negro (*Pinus uncinata*) y pino silvestre o albar (*Pinus sylvestris*).

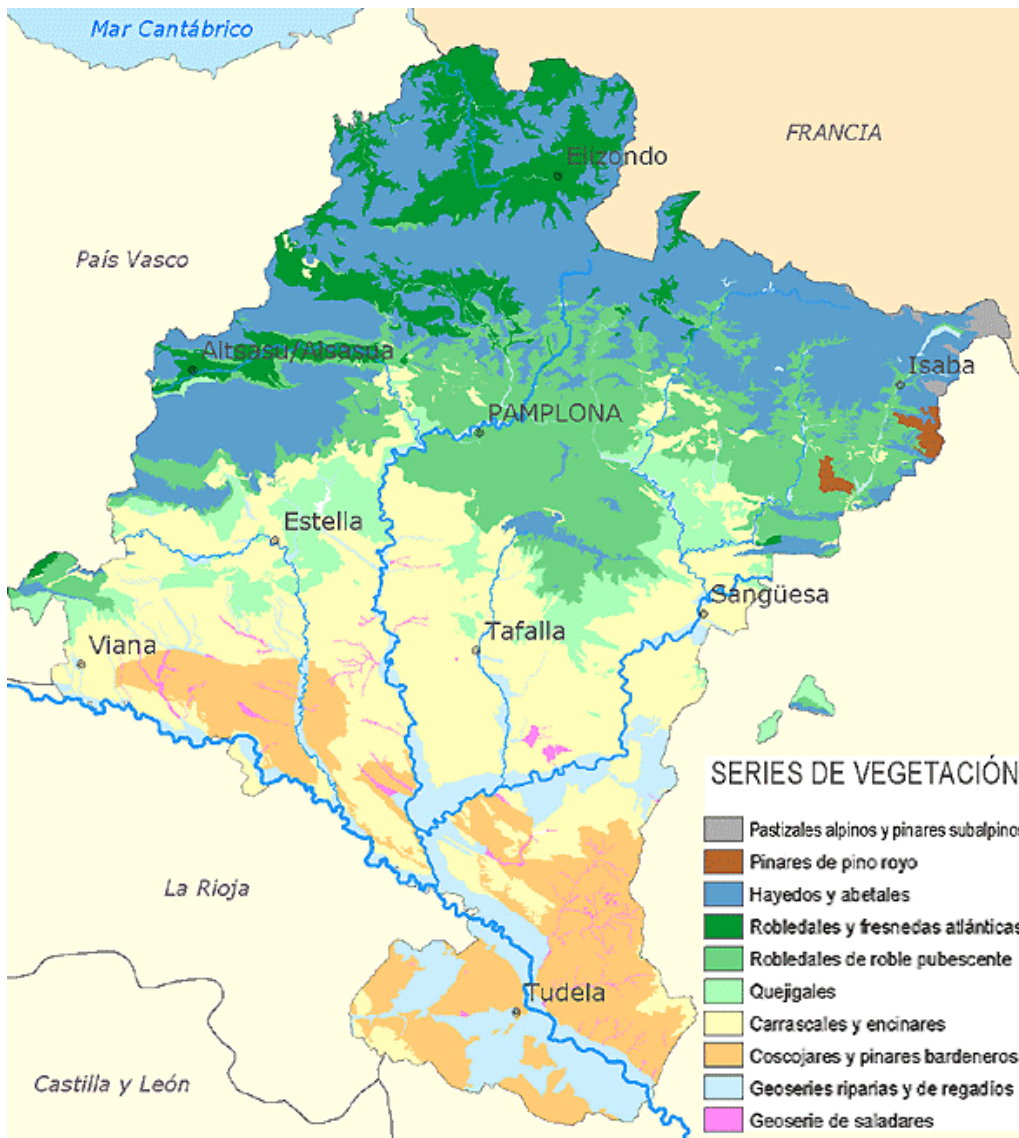


Figura 9: Series de vegetación en Navarra. (Fuente: Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra 2020)

En las parcelas de Garde (figura 10) aparecen pinares de pino silvestre o albar acidófilos, en ocasiones con masas arbóreas de hayas (*Fagus sylvatica*) y más raramente robles pelosos (*Quercus pubescens*, *Quercus subpyrenaica*). Los arbustos que componen el

sotobosque son escasos, aparece algún enebro (*Juniperus communis*) y zarzas, además de herbáceas como el heno (*Deschampsia flexuosa*), *Galium rotundifolium* o *Veronica officinalis* (Peralta, 2010).



Figura 10: Paisaje vegetal de Garde

En las parcelas de Aspurz y Navascués (figura 11) aparecen hayedos xerófilos y basófilos pirenaicos. En cuyo estrato arbóreo suele haber robles pelosos (*Quercus pubescens*), pino silvestre o albar (*Pinus sylvestris*), illón (*Acer opalus*) y más raramente abeto (*Abies alba*). En el estrato arbustivo más predominante es el boj (*Buxus sempervirens*) alcanzando una elevada cobertura. La flora de esos hayedos presenta muchas plantas comunes a los robledales de roble peloso (*Quercus pubescens*), con los que contactan, pueden aparecer herbáceas como *Hepatica nobilis* o *Viola reichenbachiana* entre otras (Peralta, 2010).

Las especies de árboles que han marcado el estudio en las parcelas han sido el pino (*Pinus sylvestris*) y el haya (*Fagus sylvatica*).



Figura 11: Paisaje vegetal de Aspurz (izq) y paisaje vegetal Navascués (der)

## 3.2. Diseño experimental

### 3.2.1. Implementación del experimento y parcelas de estudio

Las parcelas de Aspurz y Garde fueron seleccionadas en 1999 como objeto para un estudio que estableció el Servicio de Montes del Gobierno de Navarra, a través del proyecto SC96-078, “Estudio y construcción de unas tablas de producción de selvicultura variable para masas naturales de *Pinus sylvestris* L y establecimiento”. Fueron escogidas por que contenían las características representativas del 75% de los bosques de pino silvestre.

En ambas localidades se establecieron las parcelas siguiendo un diseño de bloques al azar con tres repeticiones, es decir, quedando en cada sitio de ensayo tres bloques y en cada bloque tres parcelas diferenciadas por la intensidad de clara aplicada. Por lo tanto, resultaron en cada una de las localidades 9 parcelas delimitadas de forma rectangular de dimensiones 30 x 40 m, están rodeadas por una banda perimetral de al menos 5 m de anchura, en la cual se aplicó el mismo tratamiento que a la parcela para evitar de esta manera posibles efectos de borde (figura 12).

En el inicio del estudio en estas parcelas se aplicaron diferentes tratamientos de claro.

- Tratamiento A: para las parcelas testigo, 0% de área basal retirada (sin tratamiento).
- Tratamiento B: retirada del 20% de área basal inicial (clara baja moderada).
- Tratamiento C: retirada del 30% de área basal inicial (clara baja fuerte).

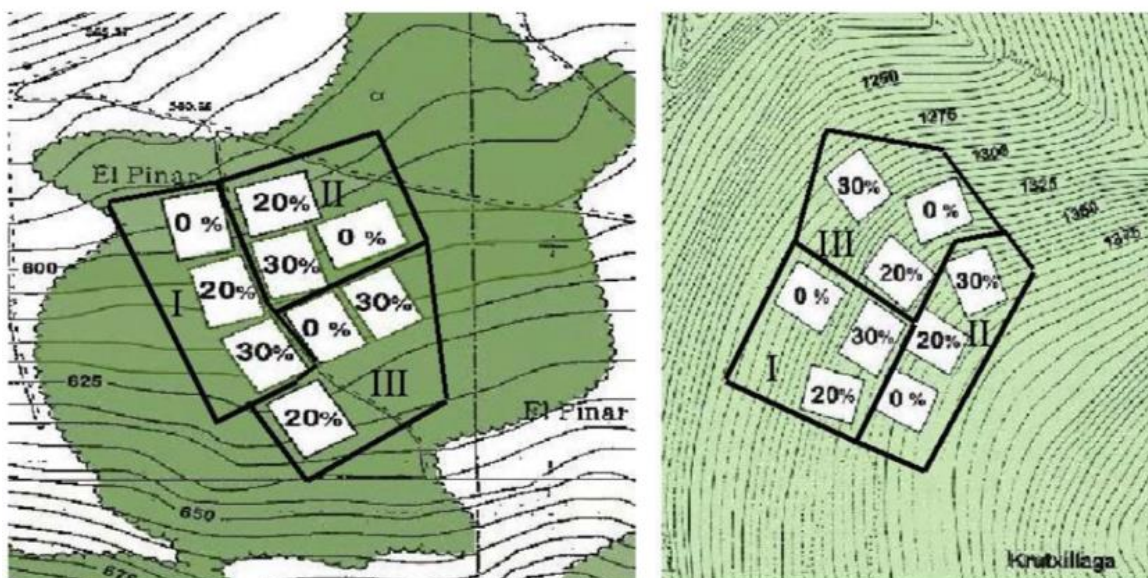


Figura 12: Ubicación de las parcelas de estudio, Aspurz (izq) y Garde (der). Los porcentajes indican el área basal retirada, y los números romanos señalan los bloques de parcelas (Blanco, 2004).

En 2009 se realizó en Aspurz un segundo clareo con una mayor intensidad, se retiró un 40% del área basal, es decir un 10% mayor a la que se realizó inicialmente en el año 1999.

En 2013 se crearon una serie de tres parcelas de 20 x 30 m en Navascués, en el término de la Reserva natural de la Foz de Benasa. Estas parcelas no han sido sometidas a ningún tratamiento de claras.

Años después, en el 2017, el grupo de Ecología y Medio Ambiente desarrollo un nuevo proyecto en estas parcelas, un segundo proyecto dentro del proyecto de investigación, Project AGL2016 – 76463 – P - TIMENUTRIENT, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad en el cual se engloban las actividades realizadas.

Este nuevo proyecto que surgió en mayo de 2017 comenzó con la implementación de un experimento de manipulación de los nutrientes en las localidades de ensayo: Garde, Aspurz y Navascués como una extensión de Aspurz al ser un hayedo más desarrollado. Este nuevo estudio se ha realizado en los tratamientos A y C de clareo, control y clara intensa respectivamente (6 parcelas). En las localidades de Garde y Navascués se escogieron 3 árboles de la especie dominante (pinos en Garde y hayas en Navascués) por parcela. En el caso de Aspurz, en cada parcela se seleccionaron tres pinos dominantes por parcela que crecían en un dosel arbóreo dominado en su mayoría por pino silvestre, y además se escogieron otras tres parcelas de un pino y un haya creciendo uno junto a otro debajo de un dosel mixto de pino y haya.

En todas las parcelas de estudio se llevaron a cabo tres tratamientos descritos a continuación.

- Tratamiento control (C): árboles marcados con una C, no están sometidos a tratamiento.
- Tratamiento fertilización (F): árboles marcados con una F, sometidos a un tratamiento de fertilización. El árbol se encuentra centrado en un área de fertilización de 2,50 x 2,00 m. Las aplicaciones se hacen desde el 2017, se aplica dos veces al año en concreto en mayo se aplicó una dosis de fertilizante NPK (Nitrofoska®) consistente en 25 kg N/ha, 11 kg P/ha y 29,39 kg K/ha. En octubre se fertilizó por segunda vez con una dosis de fertilizante N-K (FerroTop®) de 22,5 kg N/ha y 37,35 kg K/ha.
- Tratamiento sin hojarasca, *No litter* (NL): árboles marcados con una NL, sometidos a una reducción del flujo de nutrientes debido a que se instaló una malla de retención de desfronde a su alrededor (figura 13), además de eliminar periódicamente el mantillo situado bajo el área que ocupa la malla. La malla de retención esta constituida por una estructura de tubos de PVC de 2,50 x 2,00 x 150 m y una malla de aluminio con poros de 1 mm de diámetro.



Figura 13: Malla de retención del tratamiento C, para evitar que el desfronde cayese al suelo

### 3.2.2. Factores de estudio de este trabajo

Para seguir con el proyecto que se inició en 2017, se presenta este nuevo trabajo en el cual se han seguido recopilando datos para ir completando el estudio.

No se han tenido en cuenta el porcentaje de clara, puesto que ya se demostró en trabajos anteriores que no tienen influencia a nivel de árbol, y actualmente es lo que se está estudiando. Además, tampoco se han encontrado efectos de las claras sobre la composición química del suelo (Elizalde, 2019).

En este trabajo se han estudiado como varían las diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica) en función de diferentes factores:

- El sitio fue determinado según la localización y el tipo de bosque, en Aspuz encontramos pinar puro (zona solo de pino), pinar mixto (zona en la que hay pinos y hayas pero está codominada por pinos) y hayedo mixto (zona en la que hay pinos y hayas pero esta codominada por hayas), Garde esta formado por un pinar puro (zona solo de pinos), y Navascués se caracteriza porque su masa arbórea este formada por únicamente hayas (haya puro).
- La profundidad: el muestreo se hace a dos profundidades distintas, 0 – 13 cm y a 13 – 26 cm.
- El tratamiento aplicado, si es un árbol control, fertilizado o al cual se la eliminado la hojarasca.
- El mes: como anteriormente se ha explicado, la toma de muestras en este proyecto se lleva a acabo en dos meses, en mayo y en octubre



### 3.2.3. Método de campo

La toma de muestras en el campo se llevó a cabo tanto en el mes de mayo como en el mes de octubre en el año 2018.

La extracción de muestras se llevó a cabo en 6 parcelas en Garde, 6 parcelas en Aspuz y 3 parcelas en Navascués.

Para la extracción de las muestras se utilizó una barrena y se extrajeron muestras a 13 cm y 26 cm de profundidad en cada uno de los puntos establecidos (figura 14).



Figura 14: Extracción de muestras con una barrena en las parcelas de estudio de la localidad de Garde

Las muestras totales que se recogieron mensualmente en cada localidad, a ambas profundidades y diferentes tratamientos fueron, 108 en Apurz, que es un bosque de pino silvestre con presencia de áreas definidas de bosque mixto, en Garde, bosque de pino puro, se recogieron un total de 36 y en Navascués (considerado como una extensión de estudio en Aspuz por ser un hayedo monoespecífico) en el cual se recogieron 18 muestras.

Las muestras fueron recolectadas y guardadas en bolsas de plástico con cierre hermético y etiquetadas según la localización, el número de parcela, la especie (para las muestras de Aspuz), el tratamiento y la profundidad. En concreto la imagen que se muestra a continuación es de una muestra recogida en las parcelas de Garde, que al ser un pinar puro no se especifica en el etiquetado la especie de árbol (figura 15).



Figura 15: Muestra recogida en Garde, la nomenclatura etiquetada significa lo siguiente, G (Garde), 4 (Nº de parcela), F (Fertilizado), 13 (profundidad 13 cm).

### 3.3. Análisis de laboratorio

En el laboratorio las muestras fueron preparadas previamente para su análisis, en primer lugar, se dejaron secar al aire libre durante un mínimo de 48 horas abriendo las bolsas (figura 16), posteriormente las muestras fueron disgregadas y tamizadas con un tamiz de 2 mm de diámetros de poro para eliminar la fracción más gruesa.



Figura 16: Secado al aire libre de las muestras de suelo

Cuando las muestras estaban preparadas se llevó a cabo las diferentes medidas fisicoquímicas.

### 3.3.1. Medida de pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad en el suelo y es una de las características más importantes del suelo.

El pH interfiere en muchas actividades químicas y biológicas en los suelos y tiene una influencia en el desarrollo de la vegetación (Amoros *et al.*, 2015).

Se determinó el pH en relación de medida 1:2,5, es decir, 10 gramos de muestra de suelo y 25 ml de agua destilada, con una posterior agitación de 10 minutos en agitador mecánico.

El pH-metro utilizado fue el Micro pH 2001 de la marca Crison.

### 3.3.2. Medida de conductividad eléctrica

Otro potencial estimador de las propiedades del suelo es la conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica mide la concentración de sales que tiene el extracto (Amoros *et al.*, 2015).

Para medir la conductividad se utilizó el mismo extracto que para medir el pH.

El conductímetro con el que se trabajó era un Conductivimeter Micro CM 2202 de la marca Crison.

### 3.3.3. Contenido de materia orgánica

La materia orgánica de un suelo es el conjunto de restos de seres vivos y vegetales que están en proceso de descomposición, además de por la temperatura y el agua por la intervención de más seres vivos.

Para el cálculo de materia orgánica se debe calcular inicialmente el porcentaje de carbono orgánico. Se basa en la oxidación del carbono orgánico hasta  $\text{CO}_2$ , por vía húmeda, por medio del dicromato potásico ( $\text{Cr}_2\text{K}_2\text{O}_7$ ) añadiendo en cantidad exactamente conocida, todo ello en presencia de ácido sulfúrico. El exceso de oxidante se valora con sulfato ferroso amónico  $(\text{SO}_4)_2\text{Fe}(\text{NH}_4)_2$ , (sal de Mohr) y la cantidad de carbono orgánico se calcula a partir de la cantidad de dicromato reducido.

Se siguió la metodología Walkley – Black (Sikora *et al.*, 2014) (figura 17). Se toman 0,3 gramos de muestra de suelo, se les añade 10 mL de dicromato potásico 1 N y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado (verter por las paredes del Erlenmeyer ya que se produce una reacción exotérmica y se libera calor). Se agita durante 30 segundos y se deja enfriar durante 30 min. Una vez pasado el tiempo se le añadió 200 mL de agua destilada y 10 mL de ortofosfórico para evitar interferencias por parte del hierro. Además, se le añaden 3 mL de indicador difenilamina y se valoró con solución de Mohr 0,5 N. A su vez, se preparó un blanco siguiendo el mismo procedimiento anterior, pero sin muestra, para así valorar el hierro ferroso de la sal de Mohr que se ha oxidado. El porcentaje de

carbono oxidable (% CO) y de materia orgánica (% MO) se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ CO} = [(\text{mL blanco} - \text{mL muestra}) * \text{N mohr} * 0,39]$$

$$\% \text{ MO} = \% \text{ CO} * 1,724$$



Figura 17: trabajo en el laboratorio de la UPNA para la determinación del contenido de materia orgánica en las muestras de suelo.

### 3.4. Tratamiento de datos

#### 3.4.1. Gráficos

Esta tarea se realizó con el programa Microsoft® Excel para Mac, versión 16.36.

Una vez manipulados, organizados y seleccionados los datos, se tomó la decisión de qué variables respuesta combinadas con los factores de estudio se han representado en los gráficos.

Se realizaron varios gráficos en los cuales se han representado las diferentes variables de estudio frente a los factores establecidos. Estos gráficos, incluyen barras de error los cuales representan valores medios del rasgo funcional indicados por medio de barras y una media de dispersión definida por un segmento, para ello se utilizó el promedio, la desviación típica y el error estándar de cada uno de los factores a tener en cuenta.

#### 3.4.2. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos convenientes se realizaron con el software R – studio versión 1.2.5033, en concreto con el paquete R commander. R es un sistema para la implementación de funciones estadísticas y la creación de gráficos (Cayuela, 2014), aunque como se ha comentado anteriormente los gráficos presentados en el trabajo se realizaron con Excel.

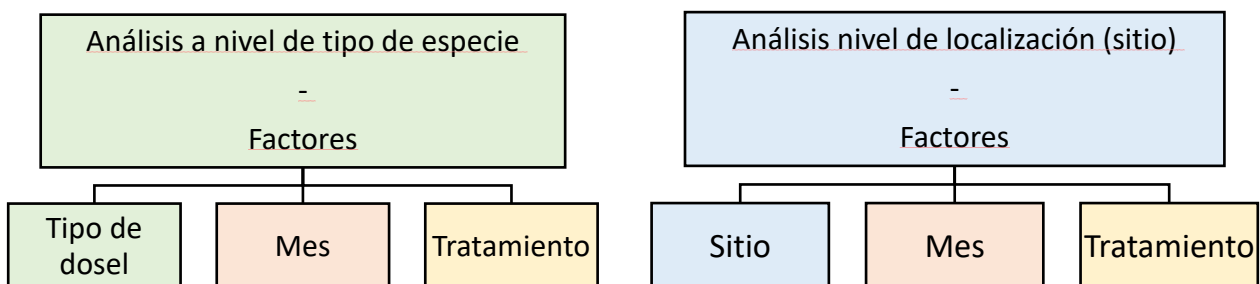
Para comprobar la posible existencia de diferencias significativas de un factor en una variable es necesario hacer un Análisis de Varianza (ANOVA), pero para ello los conjuntos de datos deben cumplir una serie de asunciones.

- Los datos deben seguir una distribución normal, para comprobar que los valores residuales de las muestras se aproximan a una distribución normal se realiza el test de Shapiro – Wilk.
- Se debe comprobar que los datos son homocedásticos, es decir que hay homogeneidad de varianzas, y para ello se realiza la prueba de Levene.

Como resultados se obtuvo que los conjuntos de datos seguían una distribución normal y homocedasticidad, a excepción de un caso en el cual los datos no cumplían las asunciones para hacer un ANOVA (normalidad y homocedasticidad) por lo que se procedió a hacer un Modelo Lineal Generalizado (GLM), que son una extensión de los modelos lineales que permiten utilizar distribuciones no normales y varianzas no constantes (Cayuela, 2014).

En los demás casos se pudo hacer el test ANOVA, que permite comparar la media de una variable entre grupos, permite comprobar si existen diferencias significativas entre los distintos grupos de datos. El nivel de significancia empleado, al igual que para las anteriores pruebas estadísticas, es de 0,05. Esto significa que, para considerar que la influencia de un factor es significativa, debe existir un 5% o menos de probabilidad de que haya diferencia entre medias de los niveles del factor que puedan deberse a errores de muestreo u otros factores no controlados, ( $p$  valor  $< 0,05$ , existen diferencias significativas). En estos casos, para detectar qué nivel del factor es distinto, se hizo una prueba a posteriori. La prueba de Tukey HSD “honestly significance difference”. Y con los resultados obtenidos en esta última prueba se añadieron a los gráficos de barras letras que indican diferencias significativas existentes entre grupos.

Se realizaron dos formas de analizar los datos en función del objeto a estudiar, en primer lugar, para observar las posibles diferencias significativas existentes entre las diferentes especies presentes en las distintas zonas de estudio, para ello se tomaron los datos obtenidos en las parcelas de Aspuz y Navascués, ya que en ambas encontramos los diferentes tipos de dosel (pino puro, pino mixto, hayedo mixto y hayedo puro), además se tuvieron en cuenta el factor mes en el que se recogieron las muestras y el factor tratamiento. En segundo lugar, se realizó un análisis estadístico para ver las posibles diferencias existentes en un mismo dosel arbóreo situado en diferente localización, por lo que para este análisis se tomaron los datos del pinar puro localizado en Aspuz y los datos de Garde en los dos meses en los cuales se recogieron las muestras y en función del tratamiento aplicado. Para ambos análisis se observaron las posibles diferencias existentes en las variables medidas (pH, contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica) en función de las posibles interacciones.



## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los diferentes resultados obtenidos tras estudiar las diferentes variables de estudio en los diferentes factores presentes.

### 4.1. Resultados en función de la profundidad

Como se ha mencionado anteriormente, las muestras fueron recogidas a dos profundidades diferentes, una medida de la capa más superficial del suelo, concretamente de los 13 primeros centímetros y otra segunda medida alcanzando los 26 cm de profundidad.

No se ha realizado análisis estadístico en el factor profundidad, ya que se ha trabajado con los datos obtenidos en las muestras de la capa superficial de la tierra (0 – 13 cm). Esto es debido a que al hacer un análisis visual inicial de los resultados, se ha observado como los valores de la medida de conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica son bastante más bajos a profundidad 26 cm que a profundidad 13 cm, lo que puede suponer que los diferentes tratamientos no han tenido el suficiente tiempo necesario como para afectar a capas más inferiores del perfil, y pueden por lo tanto generar diferencias significativas sesgadas.

Los resultados obtenidos a diferente profundidad (0-13 cm y 13-26 cm) y en diferente localidad (Aspurz, Navascués y Garde) se han representado en los siguientes gráficos, medida de pH (figura 18), medida de conductividad eléctrica (figura 19) y contenido de materia orgánica (figura 20).

En la figura 18 podemos observar como los suelos son ácidos, su pH está por debajo de 7 y cercanos a 5. En general, el pH en la capa superior ha sido menor que en la capa de suelo más profunda, excepto en el caso del hayedo de Navascués. Comparando los sitios, se ve una tendencia a un pH ligeramente superior en Garde que en el resto.

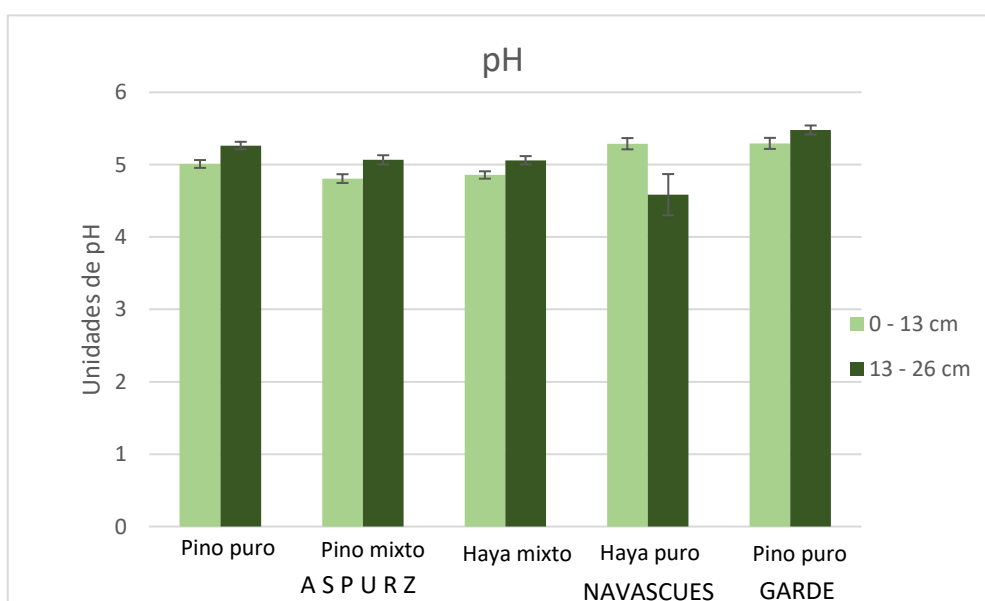


Figura 18: medida de pH en las diferentes profundidades a las cuales se han tomado las muestras de las zonas de masas arbóreas en las parcelas de estudio.

En la figura 19 podemos observar como varía la conductividad. En general, en la capa superior la conductividad eléctrica es más elevada, excepto en el caso del pinar puro de Aspuz donde los valores superiores corresponden a la capa profunda.

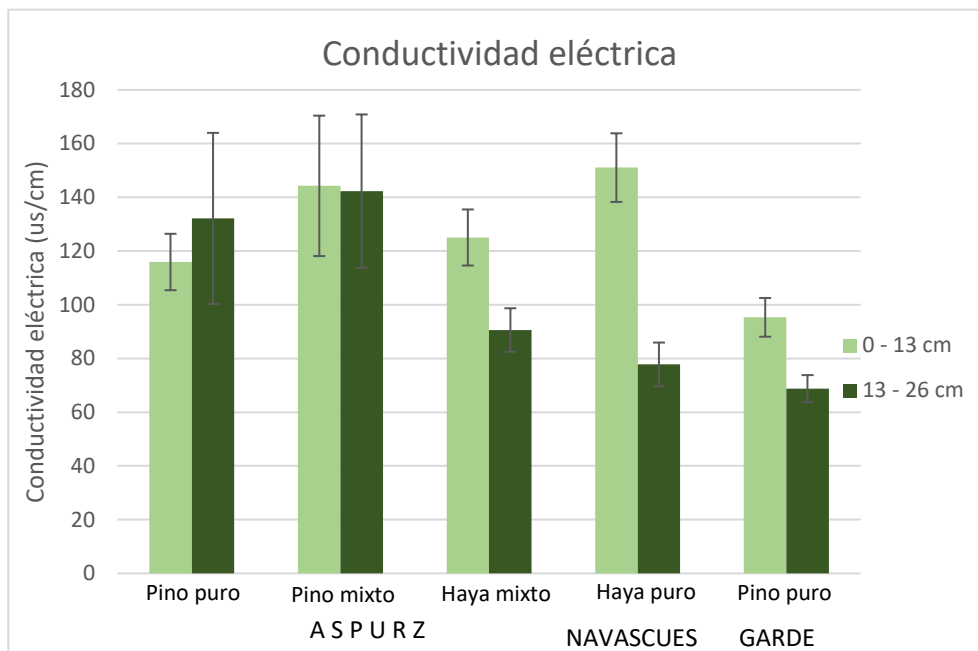


Figura 19: medida de conductividad eléctrica en las diferentes profundidades a las cuales se han tomado las muestras de las zonas de masas arbóreas en las parcelas de estudio.

El contenido de materia orgánica (figura 20) es más elevado en la zona superficial en todos los suelos estudiados. Comparando los sitios, se ve una tendencia a un contenido de materia orgánica superior en pino puro y mixto en Aspuz que en el resto.

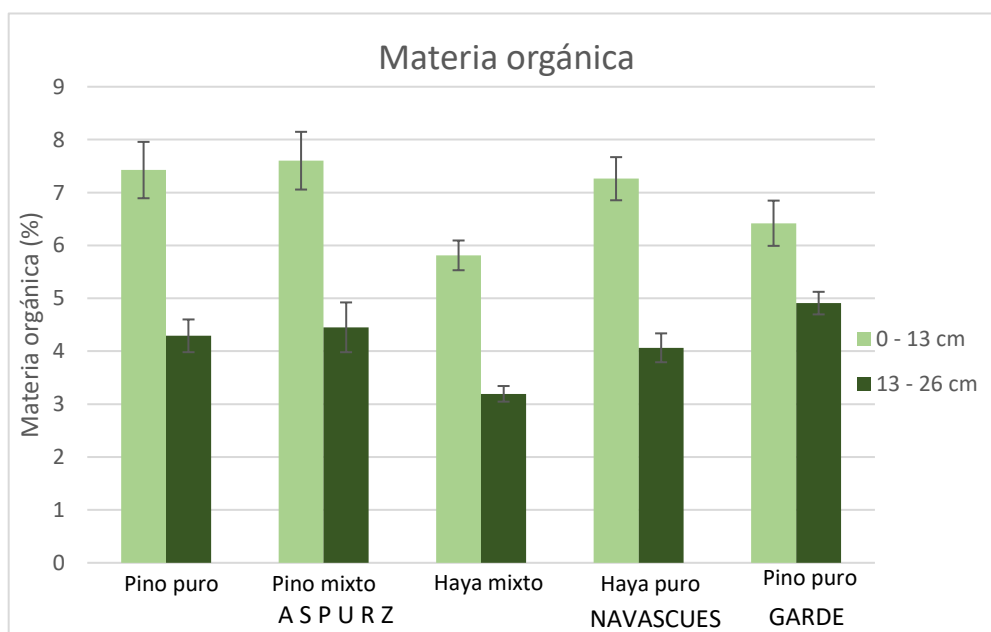


Figura 20: contenido de materia orgánica en las diferentes profundidades a las cuales se han tomado las muestras de las zonas de masas arbóreas en las parcelas de estudio.

## 4.2. Resultados del análisis estadístico

Se realizaron tres Análisis de Varianzas multifactoriales, uno por cada variable respuesta en función de los diferentes factores que influían, en función de si se querían estudiar las diferencias significativas para la especie o para el sitio (localización).

Para el análisis de la influencia de la especie dominante en el dosel arbóreo (Tipo), se realizaron tres análisis de varianza, para las variables pH, materia orgánica y conductividad eléctrica en función de los factores Tipo de dosel, Mes y Tratamiento, además de las posibles interacciones entre factores. Se realizó este análisis para averiguar las posibles diferencias de cada una de las variables entre cada uno de los factores. Para estos análisis se utilizaron los datos obtenidos en las localidades de Aspurz y Navascués, ya que es un estudio a nivel de especie y en ambas localidades existen las diferentes especies de árbol bajo los distintos tipos de dosel (pino puro, pino mixto, haya mixto y haya puro). Los datos obtenidos se representan en la tabla 4 a continuación.

Tabla 4: Resultados estadísticos de las variables analizadas para los diferentes factores teniendo en cuenta los datos de Especie. El efecto de cada factor en cada variable respuesta es: (·) casi significativo, (\*) significativo para  $p < 0,05$ , (\*\*) significativo para  $p < 0,01$  y (\*\*\*) significativo para  $p < 0,001$ .

FACTOR	VARIABLE		
	pH (p-valor)	M.O (p-valor)	C.E (p-valor)
Tipo de dosel arbóreo	$p < 0,001^{***}$	$p < 0,01^{**}$	0,058 ·
Mes	0,661	$p < 0,001^{***}$	$p < 0,001^{***}$
Tratamiento	0,066 ·	0,214	0,706
Tipo * Mes	0,345	$p < 0,01^{**}$	$p < 0,05^{*}$
Tipo * Tratamiento	0,972	0,561	0,288
Mes * Tratamiento	0,386	0,490	0,176
Tipo * Mes * Tratamiento	0,967	0,646	0,272
R <sup>2</sup>	0,109	0,204	0,615

Existieron diferencias significativas entre tipos de dosel arbóreo para el pH y la materia orgánica, y cercano a la significatividad en la conductividad eléctrica. Además de la época de recogida (mes) influyó de forma significativa tanto en la conductividad eléctrica como en la materia orgánica pero no en el pH. El tratamiento no fue significativo en ninguna variable, pero estuvo cerca de la significación en el pH. La interacción entre el tipo de dosel arbóreo y la época de muestreo fue significativa para la materia orgánica y la conductividad eléctrica, pero el resto de interacciones no fueron significativas. En cualquier caso, el ajuste del modelo fue relativamente bajo, con valores de R<sup>2</sup> menores a 0,62.

Para el análisis de la influencia del sitio, se realizaron tres análisis de varianza, para las variables pH, materia orgánica y conductividad eléctrica en función de los factores Sitio, Mes y Tratamiento, además de las posibles relaciones entre factores. Se realizaron estos análisis para averiguar las posibles diferencias de cada una de las variables entre cada uno de los factores. En este estudio se utilizaron los datos obtenidos en las localidades de Aspurz y Garde, ya que en ambas localidades existen masas arbóreas de pino puro y



se quiere estudiar las diferencias posibles a nivel de sitio entre dicho tipo de dosel arbóreo. Los datos obtenidos quedan representados a continuación en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados estadísticos de las variables analizadas para los diferentes factores teniendo en cuenta los datos de Sitio. El efecto de cada factor en cada variable respuesta es: (·) casi significativo, (\*) significativo para  $p < 0,05$ , (\*\*) significativo para  $p < 0,01$  y (\*\*\*) significativo para  $p < 0,001$ .

FACTOR	VARIABLE		
	pH (p-valor)	M.O (p-valor)	C.E (p-valor)
Sitio	$p < 0,01$ **	$p < 0,05$ *	$p < 0,05$ *
Mes	0,290	$p < 0,01$ **	$p < 0,001$ ***
Tratamiento	0,080 ·	0,476	$p < 0,01$ **
Sitio * Mes	0,987	0,506	0,270
Sitio * Tratamiento	0,230	0,3645	0,608
Mes * Tratamiento	0,386	0,663	0,261
Sitio * Mes * Tratamiento	0,793	0,624	0,658
R <sup>2</sup>	0,133	0,099	0,512

Existieron diferencias significativas entre los sitios para el pH, en el contenido de materia orgánica y en la conductividad eléctrica. Además de la época de recogida de muestras (mes) influyó de forma significativa tanto en la materia orgánica como en la conductividad eléctrica pero no en el pH. El tratamiento fue significativo para la conductividad eléctrica y estuvo cerca de la significación en el pH. Las diferencias no fueron significativas en las interacciones. En cualquier caso, el ajuste del modelo fue relativamente bajo, con valores de R<sup>2</sup> inferiores a 0,52.

### 4.3. Valores de pH del suelo

A continuación, se muestran una serie de gráficos de barras en los cuales se representan los resultados obtenidos para el estudio de la variable pH en función de los distintos factores.

#### 4.3.1. Medida de pH en función del factor tipo de dosel en el análisis a nivel de especie.

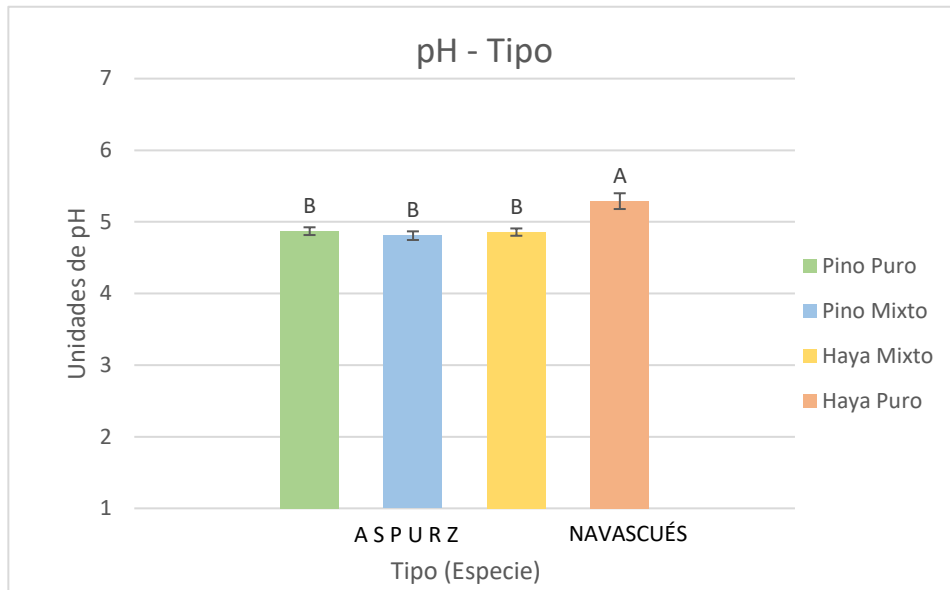


Figura 21: Representación gráfica de la medida de pH en las diferentes especies de árbol presentes en las parcelas de Aspuz y Navascués. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

En esta gráfica (figura 21) se recogen los datos de pH obtenidos en las diferentes masas arbóreas de las parcelas de estudio en Aspuz y Navascués. Todos los suelos presentaron un pH ácido con valores cercanos a 5. No existieron diferencias significativas entre las masas arbóreas de pino puro, pino mixto y haya mixto, especies que encontramos en las parcelas de Aspuz, en cambio sí que existen diferencias significativas con el hayedo puro de Navascués, el cual tiene un pH mayor.

#### 4.3.2. Medida de pH en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización



Figura 22: Representación gráfica de la medida de pH en las muestras de suelo de masas arbóreas de pino puro en las parcelas de Aspurz y Garde. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

En esta gráfica (figura 22) se recogen los datos de la variable pH obtenidos en las masas arbóreas de pino puro de Aspurz y Garde. En ambos sitios el pH es ácido con valores cercanos a 5. El pH es más elevado en el suelo de Garde que en el suelo de Aspurz (figura 22) marcando diferencias significativas entre ambas localidades.

#### 4.4. Contenido de materia orgánica

A continuación, se muestran una serie de gráficos de barras en los cuales se representan los resultados obtenidos para el estudio del contenido de materia orgánica en función de los distintos factores.

##### 4.4.1. Contenido de materia orgánica en función del factor tipo de dosel en el análisis a nivel de especie

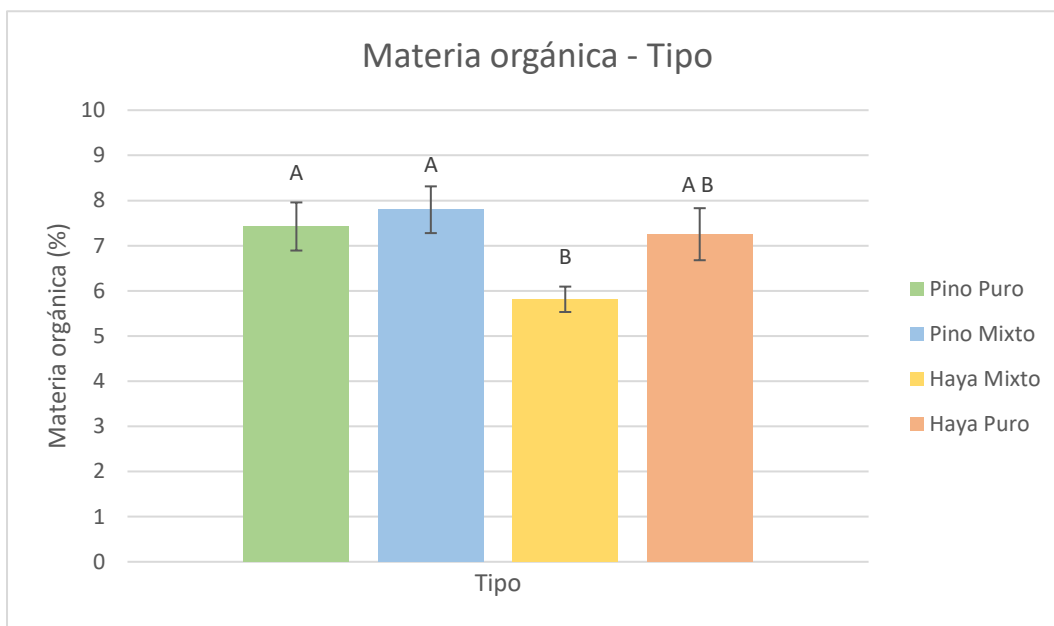


Figura 23: Representación gráfica de la medida de M.O en las diferentes especies de árbol presentes en las parcelas de Aspurz y Navascués. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

Con los estudios estadísticos se demostró que había diferencias significativas en el contenido de materia orgánica en función del tipo de masa arbórea estudiada, presentando el suelo junto a un haya y bajo un dosel mixto el contenido de materia orgánica más bajo mientras que el suelo junto a pinos (independientemente del dosel) mostraron el contenido de materia orgánica más alto. En una posición intermedia apareció el contenido de materia orgánica del suelo del hayedo puro (figura 23).

#### 4.4.2. Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie

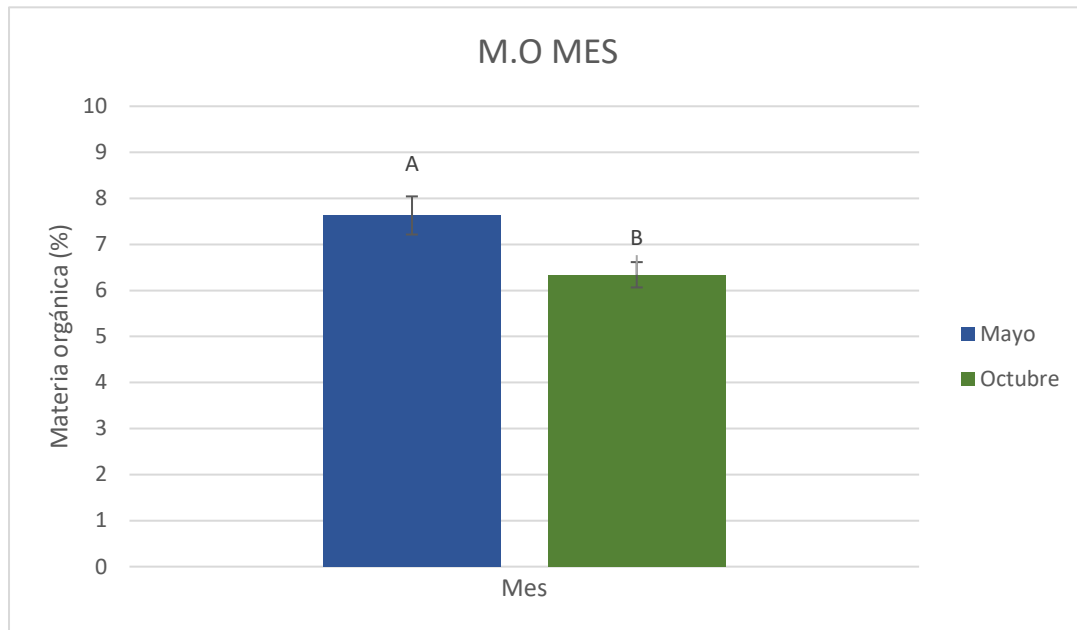


Figura 24: Representación gráfica de la medida de M.O en los meses en los cuales se recogieron las muestras de las parcelas de Aspurz y Navascués. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

La materia orgánica también fue diferente significativamente dependiendo del mes en el cual se recogieron las muestras, siendo el contenido mayor en las muestras recogidas en el mes de mayo (figura 24).

### 4.4.3. contenido de materia orgánica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie

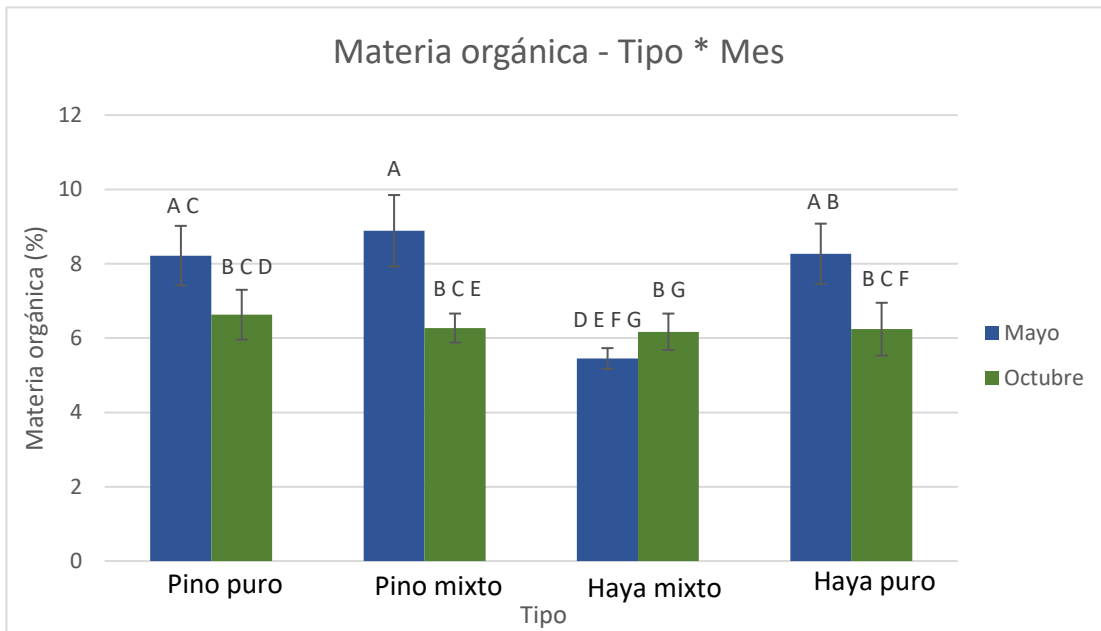


Figura 25: Representación gráfica de la medida de M.O en la interacción de los factores tipo (especie) y mes. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

Los estudios estadísticos demostraron que había evidencias significativas en el contenido de materia orgánica en la interacción tipo y mes.

A grandes rasgos podemos observar en la figura 25 que el contenido de materia orgánica en el suelo en función de las diferentes especies es muy variable en mayo, algo que no ocurre en el mes de octubre. Los datos más elevados de materia orgánica correspondieron al mes de mayo en la zona de pino mixta, seguidos de la zona de pino puro y haya puro también en mayo. En cambio, es la zona de haya mixta la que resultó ser la que menor contenido de materia orgánica tuvo en el mes de mayo, incluso es la única en la cual el contenido de materia orgánica se vio superado en el mes de octubre.

#### 4.4.4. Contenido de materia orgánica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización

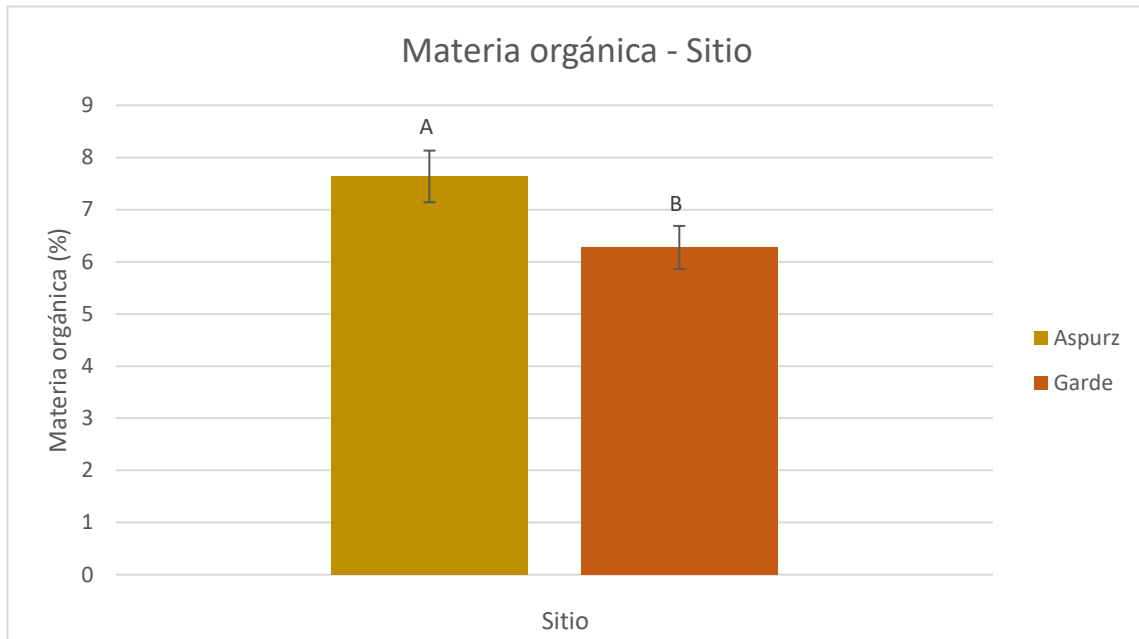


Figura 26: Representación gráfica de la medida de M.O en las muestras de suelo de masas arbóreas de pino puro en las parcelas de Aspurz y Garde. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

La materia orgánica también fue diferente significativamente dependiendo del sitio en el cual se recogieron las muestras, siendo el contenido mayor en las muestras recogidas en el pinar puro de Aspurz (figura 26).

#### 4.4.5. Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización

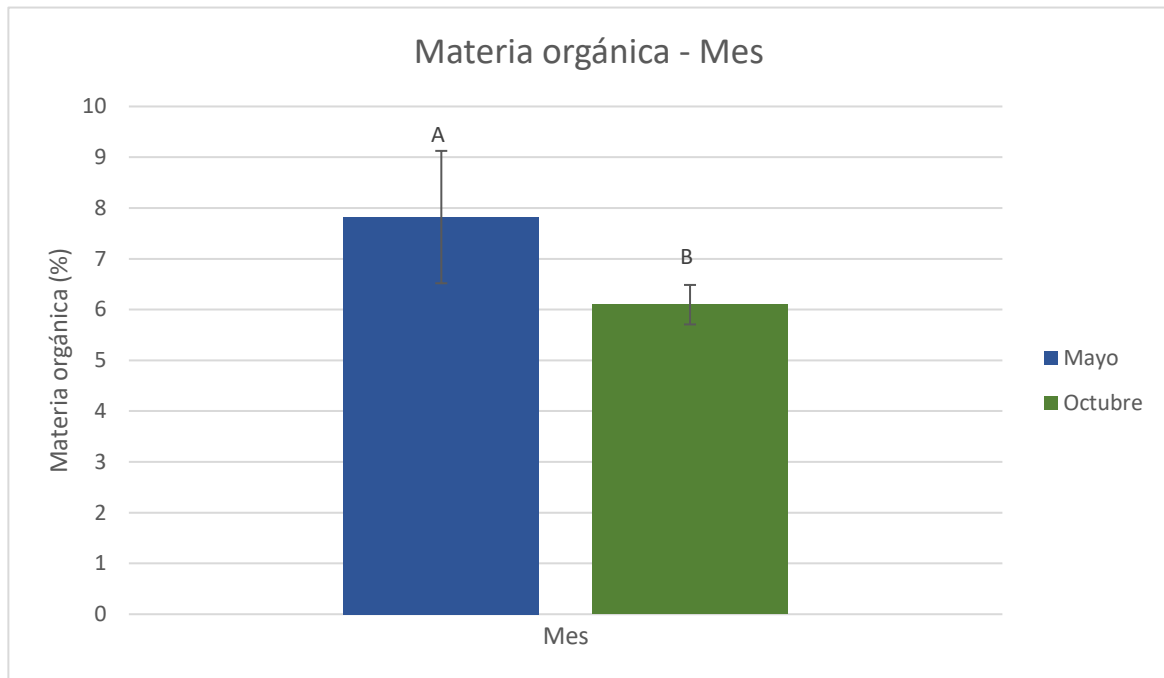


Figura 27: Representación gráfica de la medida de M.O en los diferentes meses en los cuales se recogieron las muestras de las parcelas de Aspurz y Garde. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

Los análisis estadísticos realizados para el estudio a nivel de sitio del contenido de materia orgánica en función del mes en el que se recogieron las muestras se realizaron con los datos recogidos en los suelos de pinares puro en las parcelas de Aspurz y Garde y demostraron que había evidencias significativas, siendo el mes de mayo donde el contenido de materia orgánica era superior (figura 27).



## 4.5. Conductividad eléctrica

A continuación, se muestran una serie de gráficos de barras en los cuales se representan los resultados obtenidos para el estudio de la conductividad eléctrica en función de los distintos factores.

### 4.5.1. Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie

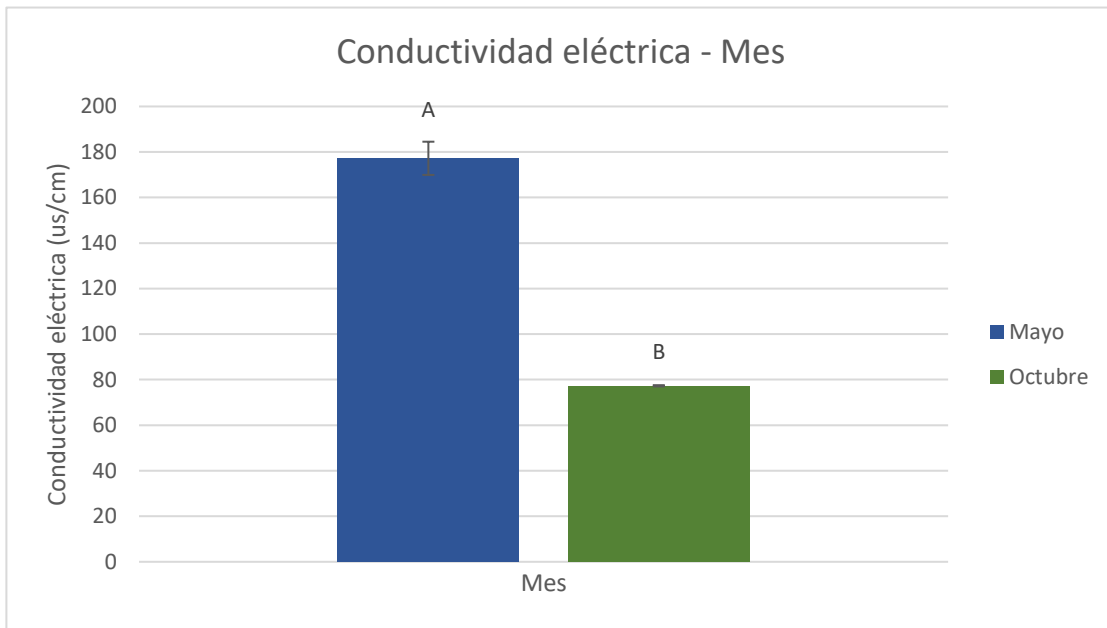


Figura 28: Representación gráfica de la medida de C.E en los diferentes meses en los cuales se recogieron las muestras de las parcelas de Aspuz y Navascués. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

Los análisis estadísticos demostraron que la conductividad eléctrica era superior en las muestras de suelo recogidas de las parcelas de Aspuz y Navascués en el mes de mayo que en el mes de octubre (figura 28).

#### 4.5.2. Medida de conductividad eléctrica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie

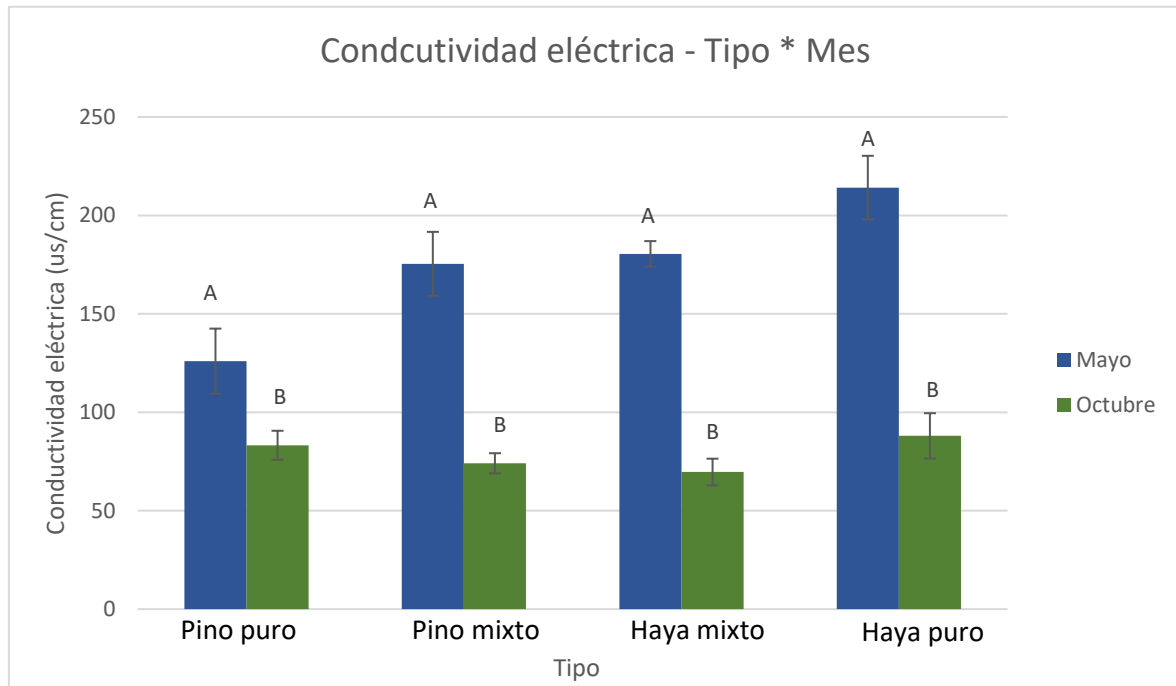


Figura 29: Representación gráfica de la medida de M.O en la interacción de los factores tipo (especie) y mes. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

La conductividad eléctrica fue más elevada en las muestras tomadas en el mes de mayo (figura 29). En función del tipo de especie, fue superior en las parcelas con presencia de haya (en Navascués de hayedo puro y en Aspurz hayedo mixto) y es en Aspurz en la zona de pinar puro donde la medida fue menor. Sin embargo, dichas diferencias entre especies no fueron estadísticamente significativas.

### 4.5.3. Medida de conductividad eléctrica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización

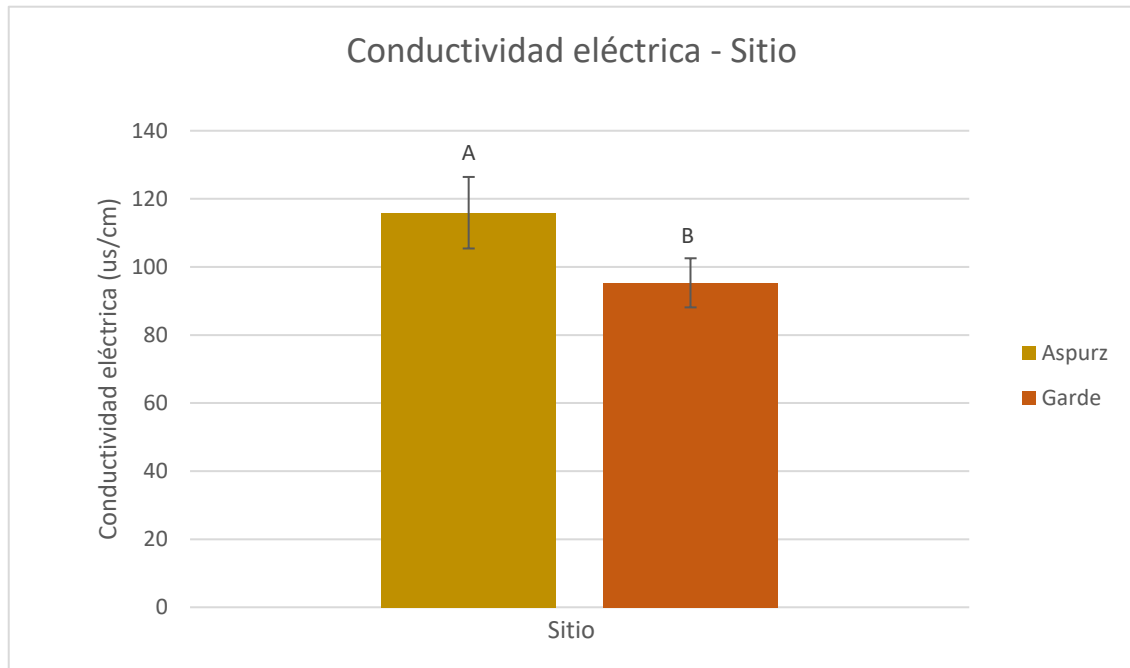


Figura 30: Representación gráfica de la medida de C.E en las muestras de suelo de masas arbóreas de pino puro en las parcelas de Aspurz y Garde. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

Los análisis estadísticos demostraron diferencias significativas en la conductividad eléctrica medida en las muestras de suelo de masas arbóreas de pino puro en Aspurz y Garde (figura 30).

#### 4.5.4. Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización

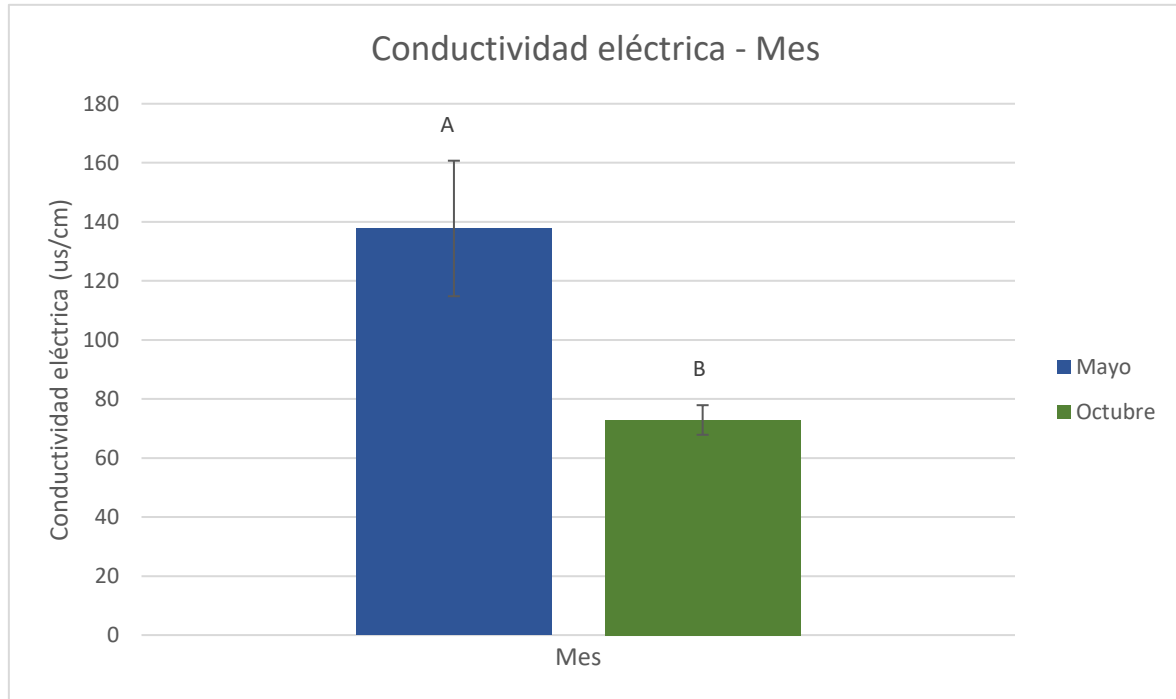


Figura 31: Representación gráfica de la medida de C.E en los diferentes meses en los cuales se recogieron las muestras de las parcelas de Aspuz y Garde. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

En función del mes la conductividad eléctrica era diferente significativamente en los suelos de pinar puro de Aspuz y Garde, siendo los valores superiores obtenidos en el mes de mayo que en el mes de octubre (figura 31).

#### 4.5.5. Medida de conductividad eléctrica en función del factor tratamiento en el análisis a nivel de localización

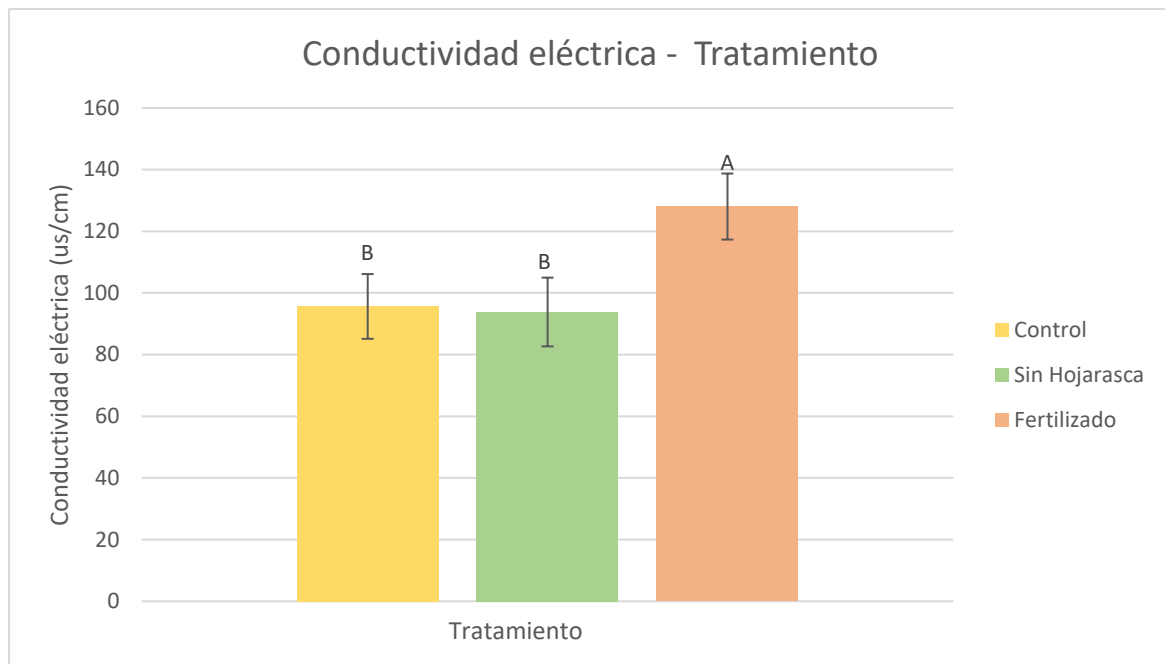


Figura 32: Representación gráfica de la medida de C.E en función de los diferentes tratamientos. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) según el análisis Tukey HSD.

Respecto al tratamiento utilizado, la conductividad eléctrica es más elevada en el tratamiento fertilizado, además de ser diferente significativamente con el tratamiento control y sin hojarasca que son semejantes (figura 32).

## 5. DISCUSIÓN

Los suelos y los bosques están intrínsecamente vinculados y tienen importantes repercusiones mutuas, por eso es necesario una gestión sostenible de los bosques para luchar contra la erosión del suelo y así asegurar su conservación, y es el suelo el que proporciona anclaje, agua y los nutrientes necesarios a los árboles. Especialmente su profundidad, pedregosidad y contenido de materia orgánica son características claves de un suelo para la supervivencia de los bosques, dado que aumentan su capacidad de retención de agua y disponibilidad para los procesos biológicos (Nadal-Sala *et al.*, 2017). Por lo tanto, es de vital importancia una buena calidad suelo en el buen funcionamiento de un bosque.

Hay que destacar que los parámetros estudiados no son variables independientes ya que todos y cada uno de ellos depende del resto. Por ejemplo, el valor de pH de un suelo puede estar relacionado en función del contenido de materia orgánica que tenga ese suelo. Además, pueden estar sujetos a otros factores como puede ser el clima, la topografía o la vegetación.

### 5.1. Profundidad

Las muestras se recogieron a profundidades diferentes, una primera superficial (0 – 13 cm) y una segunda más profunda (13 – 26 cm). Aunque anteriormente en el punto 4.1 “Resultados en función de la profundidad” ya se comenta que se ha trabajado con los datos obtenidos de las muestras recogidas en la profundidad de 0 – 13 cm.

Los valores de pH en los suelos estudiados son más bajos en el horizonte superficial, es decir son los horizontes más ácidos del perfil, esto se debe a la presencia de vegetación y actividad fúngica (Acevedo *et al.*, 2010), que liberan protones a la solución del suelo para llevar a cabo la absorción de otros cationes. Además, el valor de pH de un suelo está ligado al contenido de materia orgánica, debido a que la materia orgánica contiene una gran cantidad de grupos carboxilos (R-COOH) lo cual resulta en una alta liberación de H<sup>+</sup> y por consecuencia produce pHs ácidos, por lo que mayor contenido de materia orgánica en un suelo hace que su nivel de pH sea más bajo (Johnson, 2002). El contenido de materia orgánica en los suelos de las zonas de estudio es superior en los niveles superficiales del suelo, lo cual también puede estar relacionado a que la materia orgánica decrece con la profundidad (Acevedo *et al.*, 2010).

Los valores de conductividad eléctrica pueden variar en función de la elevación del terreno y la pendiente.

Las muestras de suelo analizadas muestran valores más elevados en la zona superficial del perfil esto puede deberse a la pendiente de las parcelas de estudio, y debido a las precipitaciones se produzcan mayores escorrentías y no se produzca filtración.

Por ello, estos suelos tienen menor capacidad para acumular agua en el perfil de suelo y por lo tanto menor conductividad eléctrica (Peralta *et al.*, 2012).

## 5.2. Medida de pH

El pH de los suelos forestales puede variar ampliamente, dependiendo de la composición química del material de origen y del tipo de vegetación dominante (Thiers *et al.*, 2014). El pH tiene una decisiva influencia en la asimilabilidad de los nutrientes y en el desarrollo de la actividad microbiana del suelo, además, aquellos procesos que generan modificaciones en el pH de un suelo provocan cambios en la reacción del suelo y consecuencias importantes en el desarrollo de plantas y en la actividad microbiana (Rodríguez, 2012).

### 5.2.1. Medida de pH en función del factor tipo de dosel en el análisis a nivel de especie

En la gráfica de la figura 21 se representan los valores de pH obtenidos en función del factor tipo a nivel de especie, observándose diferencias significativas entre los valores obtenidos en el hayedo puro de Navascués frente al pinar puro, pino mixto y hayedo mixto de Aspurz, los cuales no presentan diferencias significativas entre si, estos resultados de pH coinciden con lo demostrado en los estudios de Porta *et al.* 1999, Lilienfein *et al.* 2000, y Brady *et al.*, 1999, quienes demostraron que las acículas de las coníferas incrementaban la acidez del suelo al depositarse en el suelo.

La mayor parte de los suelos forestales son de carácter ácido y aquellos que sostienen coníferas tienden a ser más ácidos que los que sostienen frondosas (Prirchet, 1991).

### 5.2.2. Medida de pH en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización

En cambio, la figura 22 representa gráficamente los valores de pH obtenidos en función del factor sitio a nivel de estudio de localidad, es decir en los pinares situados en Aspurz y en Garde, en ambos lugares se obtuvieron valores de pH ligeramente ácidos, en torno un valor de pH de 5.

Se obtuvieron diferencias significativas en este estudio, correspondiendo a valores más bajos (suelos más ácidos) los extraídos en las parcelas de estudio situadas en Aspurz frente a los valores de pH más altos obtenidos en Garde.

La diferencia entre ambos es muy pequeña pero suficiente para ser significativa. Este caso es diferente al anterior, ya que en ambos lugares la comparación fue entre sitios, pero en el mismo tipo de suelo bajo pinar monoespecífico, por lo que la premisa de mayor acidificación por parte de coníferas frente a frondosas no será aplicable.

Lo que posiblemente ocurre en este caso es que entran en acción otros factores como son el clima, la pendiente y el contenido de materia orgánica también influyentes en los valores de pH. En Aspurz la temperatura es más elevada, las precipitaciones inferiores y la pendiente más reducida, en cambio, las temperaturas de Garde son más bajas, las

precipitaciones elevadas y una pendiente prominente, además del contenido de materia orgánica era menor (figura 26), variable ligada con el pH.

El pH de Garde es ligeramente superior frente al de Aspurz, esto puede deberse a la elevada precipitación combinada con una gran pendiente, por lo que se puede producir la escorrentía de los nutrientes que acidifican el suelo (Blanco, 2004). También puede deberse a que las precipitaciones arrastren las acículas que al depositarse en el suelo lo acidifican.

Los suelos forestales tienen una alta capacidad de infiltración del agua de lluvia debido principalmente a la gran cantidad de materia orgánica (mantillo) presente en el suelo (Stadtmüller, 1994), siendo este contenido de materia orgánica superior en Aspurz (figura 26). Además, la pendiente de Aspurz es menor, lo que favorece la filtración de las precipitaciones al no desplazarse por la pendiente.

Estos datos corresponden con los recogidos durante casi 20 años atrás, Sánchez, 2002, ya obtuvo estos mismos resultados, indicando un pH inferior en Aspurz, seguramente debido al alto contenido en materia orgánica.

### 5.3. Contenido de materia orgánica

Los suelos se forman, por lo general, a partir de materiales originarios sin materia orgánica, ya que la materia orgánica procede de plantas, animales y microorganismos y de sus productos de alteración (Porta *et al.*, 2003). Sirve como acondicionador del suelo, depósito de nutrientes, sustrato para la actividad microbiana, preservador para el medio ambiente y para incrementar de la productividad de un suelo (Hillel *et al.* 2005).

La materia orgánica es esencial para la protección de los suelos, ya que aporta estructura y estabilidad, fertilidad, aumenta la capacidad de retención de agua, previene la contaminación, además de representar una parte importante del reservorio total de carbono orgánico en los suelos forestales (Gartzia, 2009).

Gran parte de esta materia orgánica depositada en el suelo proviene del desfronde del dosel, lo que se conoce como mantillo (González *et al.*, 2018), también otra fuente de materia orgánica es la descomposición de las raíces (Blanco, 2004), siendo mas numerosas en la superficie (tablas 2 y 3). El desfronde no solo está formado por las hojas (aunque suponen un alto porcentaje del total), también lo forman los brotes, flores, frutos y trozos de corteza y ramas. Aunque se ha demostrado que la hojarasca es la fracción de caída más importante y el principal determinante del ciclo de nutrientes en las comunidades forestales (González de Andrés *et al.*, 2019). La mayoría de los nutrientes provienen de la hojarasca producida en los años anteriores, convirtiéndose el desfronde como uno de los principales mecanismos de transferencia de materia orgánica y nutrientes desde la planta al suelo (Chapin *et al.*, 2002).



### 5.3.1. Contenido de materia orgánica en función del factor tipo en el análisis a nivel de especie

El contenido de materia orgánica en los suelos estudiados ha variado en función de la especie de árbol, siendo mayor el contenido en aquellas zonas de la parcela donde predominaba el pino, tanto en zonas de pino puro como en zonas de pino mixto con codominancia de pino, frente al hayedo.

Estos resultados son semejantes al estudio realizado por Porras *et al.*, 2008, donde encontraron un contenido mas elevado de materia orgánica en los suelos habitados por bosques de coníferas.

Aunque no está demasiada clara la influencia de las especies en el almacenamiento de la materia orgánica en el suelo, esto podría deberse a la presencia de sotobosque y capa herbácea que también se descompone aumentando el contenido de materia orgánica de un suelo, siendo mayor en Apurz, ya que las hayas de Navascués han sombreado todo el suelo con sus largas ramas y hojas más grandes y el sotobosque u otras herbáceas no pueden desarrollarse al impedirse la buena iluminación del suelo, factor responsable e indispensable de la regeneración (García, 2017).

### 5.3.2. Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie

Las muestras presentaron diferente nivel de contenido de materia orgánica en función del mes de recogida, tal y como se presenta en la figura 24, el suelo de las parcelas de estudio tenía un mayor contenido de materia orgánica en el mes de mayo.

Gran parte de esta materia orgánica llega al suelo proviene del desfronde del dosel, es un mecanismo importante para la entrada de nutrientes desde la planta al suelo. Es una importante vía de retorno de nutrientes al suelo (Blanco, 2004).

La pérdida de la mayor cantidad de hojas de pino se produce a finales de verano y principios del otoño, por lo que en primavera aparecen picos máximos de concentración de N y P (nutrientes muy demandados por las hojas) en bosques de *Pinus sylvestris* (Blanco, 2004). En las ultimas décadas, el crecimiento natural o controlado de haya bajo el pino ha ido progresando hasta formar doseles mixtos, pero se sabe poco sobre su dinámica de caída de basura y el ciclo de nutrientes (González de Andrés *et al.*, 2019).

Otro factor influyente es la humedad del suelo y de la hojarasca, son una medida de la disponibilidad de agua para los descomponedores, principales responsables de la descomposición (Garrido, 2001), aunque el hecho de que no exista un déficit hídrico prolongado puede provocar menores tasas de descomposición (Blanco, 2004), por lo que en octubre al llover más (figura 7) la cantidad de materia orgánica es menor. Además, la actividad de los organismos descomponedores se ve limitada en épocas de frío.

### 5.3.3. Contenido de materia orgánica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie

El contenido de materia orgánica ha variado en función de qué especie estaba presente en esa zona de suelo y en el mes que se recogieron las muestras. Pero también existen diferencias significativas en la interacción de ambos factores.

Tal y como se presenta en la figura 25 del apartado de “Resultados”, el contenido de materia orgánica es más variable en el suelo donde están las distintas especies de árbol en mayo que en octubre, ya que como se ha comentado en el apartado anterior, en el mes de octubre el contenido de materia orgánica es menor debido a la abundante precipitación tal y como se muestra en el diagrama ombrotérmico (figura 7).

El contenido de materia orgánica más elevado corresponde a las muestras recogidas durante el mes de mayo en una zona de pino mixta, es decir, presencia de pinos y hayas con dominancia de pino en Aspurz. En otros estudios realizados sobre la acumulación de hojarasca de diferentes especies, se encontró mayor acumulación de hojarasca en pinares y hayedos, y porcentajes de materia orgánica en formaciones de coníferas (Porrás *et al.*, 2008).

### 5.3.4. Contenido de materia orgánica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización

Tal y como se muestra en la figura 26, el contenido de materia orgánica es superior en las parcelas situadas en Aspurz que en Garde.

Esto puede ser debido a la diferencia de pendiente que existe entre ambos lugares, siendo en Aspurz de un 20% y en Garde de un 40% (tabla 1). Los suelos de Garde al tener mayor pendiente, la materia orgánica puede perderse con la primera capa del perfil del suelo por escorrentía o por erosión, además esta escorrentía se ve favorecida por las altas precipitaciones que se producen en Garde. En las zonas de fuerte pendiente, frecuentemente ocupadas por plantaciones forestales, la erosión del suelo es difícil de controlar (Edeso *et al.*, 1998).

En el estudio de Blanco *et al.*, 2006 en el cual estudiaron la intensidad de claras en la producción de hojarasca en los mismos pinares de este estudio, obtuvieron que la producción de hojarasca (hojas, brotes, flores, corteza, rama, etc.) fue mayor en Aspurz que en Garde, pudiendo ser por la diferente altitud y clima existente entre las parcelas, o por la respuesta retardada de la caída de las agujas de pino en Garde en relación con Aspurz, debido a que están menos expuestas al estrés climático.

La recolección de hojarasca se realiza en los meses de septiembre a diciembre, ya que este periodo comprende el principal pico de caída de agujas de pino y hojas de haya al suelo. En estos meses se recogieron un total de 1261,9 kg/ha de acículas de pino y 582 kg/ha de hojas de haya en Aspurz y un total de 1618,2 kg/ha de acículas de pino y 7,6 kg/ha de hojas de haya en Garde (González de Andrés *et al.*, 2019).

### 5.3.5. Contenido de materia orgánica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización

Los meses de recogida de muestras fueron mayo y octubre. En mayo el contenido de materia orgánica fue más elevado en Aspurz que en Garde (figura 27). De igual manera ocurre en el estudio a nivel de especie, que el contenido de materia orgánica era superior en aquellas muestras recogidas en Aspurz y Navascués en el mes de mayo.

El contenido de materia orgánica está ligado al desfronde y a la actividad de los microorganismos descomponedores, pero la temperatura y la humedad son los dos factores abióticos más importantes que controlan la tasa de descomposición bajo condiciones naturales (Arias, 1991). Las temperaturas en ambos sitios son similares en tanto en el mes de mayo como en octubre, en cambio las precipitaciones son mayores en octubre y la descomposición está más relacionada con la humedad del suelo que con la cantidad total de precipitación (Blanco, 2004).

Además, el pico de caída de acículas es a finales de verano (Blanco *et al.*, 2006) y (Blanco *et al.*, 2008), por lo que es de esperar que en octubre sea el momento en el cual empiece a acumularse la hojarasca fresca recién caída y en mayo sea el momento en el cual el contenido de materia orgánica sea superior, ya que el contenido de compuestos solubles de la hojarasca se libera pocos meses después de la caída y se disminuye prácticamente totalmente en las etapas finales de descomposición (Blanco *et al.*, 2011).

## 5.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de los suelos permite estimar que concentración de sales contienen. Esta medida está influenciada por varias propiedades fisicoquímicas del suelo como pueden ser la textura, el contenido de materia orgánica, la humedad del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la salinidad, el pH entre otras (Simón *et al.*, 2013). La salinidad puede ser de origen litogénico, edáfico o antropogénico (Bravo *et al.*, 2017), debido a la poca actividad humana la salinidad de la zona puede estar relacionado con el material parental del suelo, ya que las parcelas de Garde están situadas sobre un sedimento marino y las parcelas de Aspurz sobre calizas. En los suelos de los ecosistemas forestales no intervenidos, la concentración de sales está normalmente muy por debajo del punto de marchitamiento, esto es una consecuencia de la acidez que impide la saturación de complejo de cambio (Resano, 2018).

No son muchos los estudios en suelos forestales en los cuales se haya incluido esta propiedad fisicoquímica, a diferencia de en cultivos agrícolas, ya que la salinidad es de gran importancia al poder ocasionar graves problemas en la producción de estos suelos, suelos con mucha salinidad no son aptos para el cultivo. Este valor debe ser inferior a 4 dS/m (Amorós *et al.*, 2015).

Los suelos de las parcelas de estudio presentan conductividades inferiores a este valor, aunque sea un valor establecido para la producción agrícola puede relacionarse con la presencia de cobertura vegetal en estos bosques. La salinidad está asociada a zonas

áridas y semiáridas, la zona norte de Navarra es más fría y húmeda por lo que no presenta problema de salinidad en suelos (Amezqueta, 2006).

#### 5.4.1. Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de especie

La conductividad eléctrica ha sido superior en las muestras recogidas en el mes de mayo en el estudio a nivel de especie, es decir, aquellas muestras recogidas en las parcelas de Aspurz y Navascués. Un descenso en la conductividad eléctrica puede ser por lavado o movimiento de sales debido a la irregularidad en la cantidad de precipitación en ese periodo de tiempo en esa zona concreta (Rodríguez *et al.*, 2012). Cabe recordar que según el diagrama ombrotérmico (figura 7) la precipitación es más elevada en el mes de octubre pudiendo ser éste el motivo por el cual la conductividad eléctrica sea superior en mayo, porque en octubre se ha producido un posible lavado de sales.

#### 5.4.2. Medida de conductividad eléctrica en función de la interacción tipo y mes en el análisis a nivel de especie

En este caso, hubo diferencias significativas entre la interacción tipo de dosel y mes (figura 29). Los valores más elevados corresponden a todas las especies en el mes de mayo, que son diferentes significativamente del mes de octubre.

Los valores más altos de conductividad corresponden a las muestras de suelo de hayedo de Navascués recogidas en el mes de mayo.

Aunque no está claro por qué en el hayedo puro de Navascués la conductividad es más elevada que en otros doseles de Aspurz, este hecho puede relacionarse a que las acículas de pino acidifican el suelo (figura 21), y al igual que en el estudio de Resano (2019), los resultados de conductividad eléctrica son inversos a los resultados de pH, aunque pareciese más lógico que los valores de pH y conductividad siguiesen tendencias similares, ya que un suelo cuanto más básico sea, más cationes básicos habrá adsorbidos en el complejo de cambio y en la solución del suelo, por lo tanto mayor conductividad.

#### 5.4.3. Medida de conductividad eléctrica en función del factor sitio en el análisis a nivel de localización

La conductividad eléctrica es una medida que va ligada al clima de la zona, en especial a la precipitación. Se han obtenido diferencias significativas entre ambas localidades donde se encuentran las parcelas.

En función de su origen litológico, las parcelas de Garde están situadas sobre un Cambisol districo. Los cambisoles se caracterizan por tener marcada la diferenciación de horizontes (tabla 3), por tener un alto % de arcilla y por producirse una remoción de los carbonatos por su estructura (FAO, 2008). Las parcelas situadas en Garde tienen menor conductividad eléctrica que las de Aspurz (figura 30), esto indica que hay un mayor

lavado de sales en Garde que en Aspurz, lo cual puede deberse a las precipitaciones más elevadas de Garde que en Aspurz, además de la pendiente (tabla 1).

El estudio que realizó Resano (2019), refuerza estos resultados obtenidos, atribuyendo el descenso de la conductividad eléctrica a las elevadas precipitaciones de la zona.

Huarte (2003) analizó las propiedades fisicoquímicas de estos suelos obteniendo también mayores niveles de conductividad eléctrica en los suelos de las parcelas situadas en Aspurz.

#### 5.4.4. Medida de conductividad eléctrica en función del factor mes en el análisis a nivel de localización

Como ya se ha comentado anteriormente, la conductividad eléctrica es una medida que se ve influenciada entre otros muchos factores, por la precipitación. La precipitación lava las sales del suelo disminuyendo la conductividad eléctrica de la zona, además, si la pendiente es muy elevada se favorecerá un lavado de sales por escorrentía. Como se presenta en los diagramas ombrotérmicos (figuras 7 y 8), en el mes de octubre llueve más que en el mes de mayo, tanto en la localidad de Aspurz como en la de Garde, por lo tanto, en el mes de octubre se producirá un mayor lavado de sales y la conductividad eléctrica presentará valores más bajos que en mayo. Al igual ocurre en la medida del factor mes en el estudio a nivel de especie (apartado 5.4.1), es en el mes de mayo cuando la conductividad eléctrica presenta valores más elevados.

El estudio que realizó Lizarraga (2011) refuerza estos resultados ya que en su estudio atribuye el descenso de la conductividad del suelo al aumento de las precipitaciones.

#### 5.4.5. Medida de conductividad eléctrica en función del factor tratamiento en el análisis a nivel de localización

Se han obtenido diferencias significativas en el tratamiento aplicado a las parcelas de ambas localidades. En ambas localidades el suelo fertilizado presenta una mayor conductividad eléctrica, valores más elevados que en los suelos control o sin hojarasca. Esto se debe a que el fertilizante utilizado aporta sales al suelo por lo tanto aumenta la conductividad eléctrica en los suelos a los que se ha aplicado este tratamiento. Este resultado se repite al obtenido en el estudio de Resano (2019).

## 6. DISCUSIÓN GENERAL

A lo largo de este trabajo hemos encontrado distintos resultados en función de las diferentes variables fisicoquímicas estudiadas. Esto puede deberse a numerosos factores abióticos como son el clima, la orografía y la competencia con otras especies colindantes, así como la localización o el momento en el que recogieron las muestras.

El pH es una de las propiedades más importantes del suelo, ya que interfiere en numerosas actividades químicas y biológicas. Con los resultados obtenemos que el pH es inferior en las zonas donde la presencia de coníferas es mayor frente a las zonas de frondosas, es decir, en el análisis a nivel de especie, el pH es más bajo en las parcelas de Aspurz que en las parcelas de Navascués, por lo que se cumpliría la tercera hipótesis, ya que el tipo de especie dominante en cada zona modifica esta propiedad química. En el análisis a nivel de localización (sitio) observamos como aun siendo la misma especie el carácter local influye y genera diferencias significativas, siendo el pH inferior en Aspurz que en Garde, por lo que se cumple la segunda hipótesis. Para esta variable se rechaza la primera hipótesis, ya que los diferentes tratamientos no influyen en esta variable.

La materia orgánica depositada en el suelo proviene de la descomposición del desfronde de hojas, ramas, raíces dando lugar al mantillo. La materia orgánica es de carácter ácido por lo que es una medida que se puede relacionar con la medida de pH. En el análisis a nivel de especie el contenido de materia orgánica es superior en las zonas de pino frente a las zonas de haya, (el pH es inferior en las parcelas de Aspurz que en las de Navascués), en este caso también se cumple la tercera hipótesis. El mes en el que se recogieron las muestras también produjo diferencias significativas en el contenido de materia orgánica siendo superior en el mes de mayo en estas parcelas. En el análisis a nivel de localización (sitio) surgieron diferencias significativas en el contenido de materia orgánica en función del sitio, siendo más elevada en Aspurz que en Garde, la misma tendencia que para el pH, por lo que también se cumple la segunda hipótesis. Se rechaza también la primera hipótesis ya que el contenido de materia orgánica no presenta diferencias significativas en función de los diferentes tratamientos aplicados.

La conductividad eléctrica permite averiguar la concentración de sales que tiene el suelo. En suelos forestales no se ha recalado tanto así como en suelos agrícolas ya que una elevada salinidad puede ser determinante para la producción de cultivos. En el análisis a nivel de especie se han encontrado diferencias significativas en el mes de recogida de muestras, siendo este valor más elevado en las muestras recogidas en mayo, pudiendo deberse a la precipitación o a otras condiciones climáticas del momento. En el análisis a nivel de localización (sitio) existen diferencias significativas en función de la localización de las parcelas, es en los suelos de Aspurz donde la conductividad eléctrica es mayor frente a la de Garde, con estos resultados se cumpliría la segunda hipótesis. En estas muestras igual que para el análisis a nivel de especie también es en mayo cuando las muestras presentan mayor conductividad eléctrica. Por otro lado, esta variable es la única que cumple con la primera hipótesis, ya que aparecen diferencias significativas en función del tratamiento aplicado, siendo el tratamiento fertilizado el que presenta valores de conductividad más elevados y diferentes significativamente frente a los tratamientos control y sin hojarasca. La conductividad eléctrica no presenta

diferencias significativas en los diferentes tipos de dosel por lo que la tercera hipótesis se rechaza.

Anteriormente ya se ha comentado que este estudio se ha realizado en las mismas parcelas en las cuales se han elaborado diferentes trabajos con diferentes variables como el desfronde o la descomposición, variables que influyen en el ciclo de nutrientes y por lo tanto puede relacionarse con las variables analizadas en el trabajo.

El clareo es una de las prácticas de la silvicultura más utilizada, consistiendo en la reducción del dosel arbóreo para evitar competencia entre árboles y estimular la producción de materia utilizable (madera). Esta técnica marcó el inicio de las investigaciones en estas parcelas siendo el último clareo realizado en el año 2009. El hecho de que la última clara se realizará hace bastante tiempo (1999 en Garde y 2009 en Aspurz) puede haber provocado que se igualen las condiciones ya que los huecos producidos en el aclareo han sido ocupados igualando las condiciones de la parcela sin aclareo.

Aunque el último clareo se realizó en Aspurz, el contenido de materia orgánica es superior que en Garde, esto puede deberse a que en Aspurz con el clareo se produjo el crecimiento de otras especies de árbol o de arbustos, ya que en sitios donde la liberación de nutrientes ocurre más rápido pueden mostrar mayores tasas de crecimiento de árboles después del adelgazamiento (Blanco *et al.*, 2010) o incluso puede ser porque los pinos de Garde sean más grandes y más viejos y por tanto sean menos productivos (Agós, 2018).

El tratamiento de claras no ha tenido efecto actualmente en la conductividad eléctrica del suelo debido a el largo periodo de tiempo transcurrido desde que se llevaron los aclareos, por lo que el efecto si lo hubo, puede haber desaparecido (Resano, 2018).

Tras realizarse los distintos clareos en ambos sitios, la tasa de descomposición de la materia orgánica era superior en Aspurz, las condiciones climáticas eran mas óptimas que las de Garde para la descomposición de la hojarasca (Blanco *et al.*, 2010).

A pesar de que hoy en día no se realizan los clareos esta diferencia sigue existiendo, por lo que en la tasa de descomposición se ve influencia por muchos otros factores climáticos aparte de por la reducción de la cobertura vegetal.

Son numerosos los factores que pueden influir en el ciclo de nutrientes de un suelo y que puedan determinar el buen funcionamiento de un ecosistema forestal. Por lo que es necesario realizar diferentes análisis de las distintas variables para conocer los flujos de nutrientes y energía en un suelo forestal.

## 7. CONCLUSIONES

- La profundidad es un factor que influye en las variables estudiadas, sobre todo en el contenido de la materia orgánica, siendo mayor en la zona superficial del perfil.
- Se cumple la primera hipótesis únicamente en el tratamiento de fertilizado en la conductividad eléctrica en el estudio a nivel de sitio, debido a que el fertilizante utilizado aporta sales y causa un aumento de conductividad.
- Se cumple la segunda hipótesis, la localidad de las parcelas es un factor determinante que genera diferencias significativas en todas las variables medidas. Esto se debe a la diferente climatología y geología existente entre las parcelas estudiadas de Aspurz y Garde.
- Se cumple la tercera hipótesis, ya que existen diferencias significativas entre los diferentes doseles arbóreos estudiados en el contenido de materia orgánica y en el pH.
- Las condiciones climáticas en el momento de recogida de las muestras también es un factor importante que genera diferencias significativas en los distintos análisis en el contenido de materia orgánica y en la conductividad eléctrica.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Sandoval, O., Valera-Perez, MA, y Prieto-García, F. (2010). Propiedades físicas, químicas y minerales lógicas de suelos forestales en Acaxochitlán, Hidalgo, México. *Universidad y ciencia*, 26 (2), 137-150.
- Agós Muniáin, M. (2018). Influencia de la gestión forestal sobre la producción de desfronde en dos bosques del pirineo navarro. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Departamento del Medio Natural. Pamplona.
- Amezketa, E. (2006). Problemática relacionada con la salinidad del suelo en Navarra. Retrieved June 15, 2020, from <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/DC788C10-FD10-4CAB-9829-67EAC828A8C6/0/NavarraSalinidadSuelos.pdf>
- Amorós, J. A., Bravo, S., García-Navarro, F. J., Pérez-De-Los-Reyes, C., Chacón, J. L., Martínez, J., & Jimenez-Ballesta, R. (2015). Atlas de suelos vitícolas de Castilla-La Mancha. *Arte y comunicación Calatrava. Financiado por Globalcaja-UCLM*, 318.
- Arias, H. A. (1991). La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. *Agronomía colombiana*, 8(2), 384-388.
- Aspurz, J. (2015). *Estudio del desfronde en bosques mixtos del Pirineo Navarro: comparación de datos de campo con datos el modelo ecológico FORECAST*. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Departamento del Medio Natural. Pamplona.
- Báscones, E. (2005). Análisis de suelo y consejos de abonado. *Valladolid: INEA*.
- Blanco, J. A. (2004). *La práctica de las claras forestales y su influencia en el ciclo interno de nutrientes en dos bosques de pino silvestre de los Pirineos navarros*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural. Pamplona.
- Blanco, J. A., Imbert, J. B., & Castillo, F. J. (2006). Influence of site characteristics and thinning intensity on litterfall production in two *Pinus sylvestris* L. forests in the western Pyrenees. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 342-352.
- Blanco, J. A., Imbert, J. B., & Castillo, F. J. (2008). Nutrient return via litterfall in two contrasting *Pinus sylvestris* forests in the Pyrenees under different thinning intensities. *Forest Ecology and Management*, 256(11), 1840-1852.

- Blanco, J. A., Imbert, J. B., & Castillo, F. J. (2011). Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions. *Biogeochemistry*, 106(3), 397-414.
- Blanco, J. A., Imbert, J. B., & Castillo, F. J. (2015). Adaptación al cambio climático en pinares pirenaicos: controlando la densidad del rodal según el tipo de clima. *Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España*, 565-572.
- Brady, NC y Weil, RR (1999). Materia orgánica del suelo. *La naturaleza y las propiedades de los suelos*. Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey, 446-490.
- Bravo, S., García-Ordiales, E., García-Navarro, F. J., Amorós, J. Á., Pérez-de-los-Reyes, C., Jiménez-Ballesta, R., ... & Higuera, P. (2019). Geochemical distribution of major and trace elements in agricultural soils of Castilla-La Mancha (central Spain): finding criteria for baselines and delimiting regional anomalies. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3100-3114.
- Castaño, B. E. A. (2011). Sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. *Memorando de Derecho*, 2(2), 13-21.
- Castrillo, L. (2004). Los bosques como sumideros de carbono: una necesidad para cumplir con el Protocolo de Kioto. *Revista Montes*, (76), 8-12.
- Cayuela, L. (2014). *Una introducción a R*. Área de Biodiversidad y Conservación. Universidad Rey Juan Carlos. Móstoles (Madrid).
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer Science & Business Media.
- De Andrés, J. P. (2010). Vegetación Potencial de Navarra 1: 25.000 Comarca Agraria II: Pirineos Memoria.
- Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra. Retrieved April 6, 2020 from [http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion\\_agraria/MapaCultivos/index2.html](http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/MapaCultivos/index2.html)
- Edeso, J. M., Merino, A., González, M. J., & Marauri, P. (1998). Manejo de explotaciones forestales y pérdida de suelo en zonas de elevada pendiente del País Vasco. *Cuaternario y Geomorfología*, 12(1-2), 105-116.
- Elizalde Arbilla, M. (2019). *Caracterización de la biomasa radicular fina de haya *Fagus sylvatica* en dos bosques mixtos del pre-pirineo navarro*. Trabajo de Fin de Máster. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos. Universidad pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural. Pamplona.

- FAO. (2008). Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Retrieved June 29, 2020 from <http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- FAO. (2020). Términos y Definiciones FRA 2020. Roma. Retrieved April 22, 2020, from <http://www.fao.org/3/i8661ES/i8661es.pdf>
- FAO. (2020). Portal de Suelos de la FAO. Retrieved May 1, 2020, from <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Gallardo, A., Covelo, F., Morillas, L., & Delgado, M. (2009). Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Revista Ecosistemas*, 18(2).
- García Sancet, M. Á. (2017). *Influencia de los parámetros de dosel y lumínicos sobre la regeneración del Pinus sylvestris en un bosque mixto con tres intensidades de clara*. Trabajo de Fin de Máster. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos. Universidad pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural. Pamplona.
- Garrido, M. V. (2001). *Ciclos de nutrientes: producción, descomposición y dinámica de los elementos minerales de los detritos arbóreos*. (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca).
- Gartzia, N. (2009). *Estructura y dinámica de la materia orgánica del suelo en ecosistemas forestales templados de lo particular a lo general*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. Vitoria – Gasteiz.
- Gil-Tena, A. (2010). Factores determinantes de la riqueza, distribución y dinámica de las aves forestales a escala de paisaje en Cataluña: Implicaciones para la gestión forestal sostenible. *Revista Ecosistemas*, 19(2).
- Ginés, I., & Mariscal-Sancho, I. (2002). Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. *Recuperado el*, 5.
- Gobierno de Navarra. (2020). Los bosques y montes de Navarra. Retrieved April 28, 2020 from [https://www.navarra.es/home\\_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/Los+bosques+de+Navarra.htm](https://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/Los+bosques+de+Navarra.htm)
- Gonzalez de Andres, E., Seely, B., Blanco, J. A., Imbert, J. B., Lo, Y. H., & Castillo, F. J. (2017). Increased complementarity in water-limited environments in Scots pine and European beech mixtures under climate change. *Ecohydrology*, 10(2), e1810

- González de Andrés, E., Blanco, J. A., Imbert, J. B., Guan, B. T., Lo, Y. H., & Castillo, F. J. (2019). ENSO and NAO affect long-term leaf litter dynamics and stoichiometry of Scots pine and European beech mixedwoods. *Global change biology*, 25(9), 3070-3090.
- González, G. M., Fernández, R. O., Leiva, C. L., Ruiz-Peinado, R., Senespleda, E. L., Oviedo, A. B., & del Río Gaztelurrutia, M. (2018). Acumulación y descomposición del desfronde en suelos forestales. *Foresta*, (71), 38-50.
- Hillel, D., & Hatfield, J. L. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Vol. 3). Amsterdam: Elsevier.
- Huarte, F. (2003). Influencia de las diferentes intensidades de aclareo sobre las propiedades del suelo en dos bosques de pino silvestre del Pirineo navarro. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural. Pamplona.
- Imbert, J. B., Blanco, J. A., & Castillo, F. J. (2004). Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 479-506
- Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA). Retrieved April 2, 2020, from <https://idena.navarra.es/>
- Johnson, C. E. (2002). Cation exchange properties of acid forest soils of the northeastern USA. *European Journal of Soil Science*, 53(2), 271-282.
- Kimmins, J. P. (2003). Ordenación del Ecosistema Forestal: una necesidad del medio ambiente. Pero, ¿Se trata de una realidad práctica o simplemente de un ideal eco-utópico?. Retrieved April 27, 2020, from <http://www.fao.org/3/xii/ms18-s.htm>
- Lilienfein, J., Wilcke, W., Ayarza, M. A., Vilela, L., do Carmo Lima, S., & Zech, W. (2000). Soil acidification in *Pinus caribaea* forests on Brazilian savanna Oxisols. *Forest ecology and management*, 128(3), 145-157.
- Lizarraga, I. (2011). *Influencia de las claras y el tipo de dosel en las características físico-químicas del suelo en un bosque mixto del Pirineo Navarro (2007-2009)*. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural. Pamplona
- López, A. J. (2005). Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla.

- Martínez Agut, P. (2011). Año 2011: Año Internacional de los bosques, declarado por las Naciones Unidas. Retrieved April 27, 2020, from <http://quadernsanimacio.net/ANTERIORES/trece/pdf/anyo2011.pdf>
- Martínez, S. G., & Bravo, F. (2008). Regeneración natural, establecimiento y primer desarrollo del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). *Forest Systems*, 8(3), 225-247.
- Meteo.Navarra. (2020). Ficha climática estación manual Navascués. Retrieved April 2, 2020, from <http://meteo.navarra.es/climatologia/selfichaclima.cfm?IDEstacion=178&tipo=MAN>
- Meteo.Navarra. (2020). Ficha climática estación manual Urzainqui. Retrieved April 2, 2020, from <http://meteo.navarra.es/climatologia/selfichaclima.cfm?IDEstacion=226&tipo=MAN>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2020). Bosques españoles y su evolución. Retrieved April 30, 2020, from <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-forestal-nacional/index.aspx>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2020). Política Forestal en España. Retrieved April 30, 2020, from <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/planificacion-forestal/politica-forestal-en-espana/index.aspx>
- Nadal-Sala, D., Sabaté, S., & Gracia, C. (2017). Importancia relativa de la profundidad del suelo para la resiliencia de los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) frente al incremento de aridez debido al cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 26(2), 18-26.
- Peralta, N. R., Franco, M. C., Herber, L., & Costa, J. L. (2012). La conductividad eléctrica aparente: una herramienta para reducir la escala del mapa de suelos y delimitar zonas de manejo sitio-específico. In *XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Perry, D. A., Oren, R., & Hart, S. C. (2008). *Forest ecosystems*. JHU press.
- Porras, E. M., Galván, L. C., Martín, J. A. M., Palomares, Á. T., & García-Mares, M. R. T. (2008). Influencia del dosel arbóreo en las características químicas del suelo. Análisis comparativo de suelo bajo robledales, hayedos y pinares. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (25), 287-292.
- Porta Casenellas, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Mundi-Prensa. *Bilbao, España*.

- Porta Casenellas, J., Reguerín, L. A., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España, Mundi – Prensa.
- Primicia, I. (2013). Influencia de la intensidad de clara y tipo de dosel en el ciclo interno de nutrientes y el crecimiento secundario de pino silvestre en un bosque mixto de los Pirineos occidentales. *Ecosistemas*, 22(3), 131-135.
- Pritchett, W. (1991). Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. México, Editorial Limusa.
- Puigdefábregas, J. T. (2001). Factores que controlan las relaciones entre precipitación, escorrentía e infiltración en zona árida y sus implicaciones en la gestión del agua. *Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas*, 29-36
- Ramírez Carvajal, R. (1997). Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.
- Real Academia Española: *Diccionario de la lengua española*, 23.ªed., [versión 23.3 en línea]. Retrieved April 22, 2020, from <https://dle.rae.es/bosque?m=form>
- Resano, M. U. (2019). *Influencia de la alteración de la entrada de nutrientes en las propiedades físico – químicas del suelo en dos bosques del Pirineo Navarro*. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural. Pamplona.
- Rodríguez García, L., Curetti, G., Garegnani, G., Grilli, G., Pastorella, F., & Paletto, A. (2016). La valoración de los servicios ecosistémicos en los ecosistemas forestales: un caso de estudio en Los Alpes Italianos. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 41-52.
- Rodríguez-Oroz, M. D. (2012). *Caracterización de los suelos de una cuenca forestal: Estudio de los contaminantes metálicos y su dinámica en el sistema edáfico*. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. Pamplona.
- Rodríguez, R., Larreal, M., & Larreal, J. J. M. (2012). Comportamiento de la conductividad eléctrica en dos series de suelo del sector caño San Miguel, municipio Mara, estado Zulia, Venezuela durante un periodo de tres años. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 881-889.
- Sánchez, I. (2002). *Pérdidas de peso y variables abióticas, relacionadas con distintas intensidades de aclareo en dos bosques de Pinus sylvestris L. Del Pirineo Occidental*. Trabajo Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. U.P.N.A. Pamplona.

- Schoenholtz, S. H., Van Miegroet, H., & Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest ecology and management*, 138(1-3), 335-356.
- Sikora, FJ y Moore, KP (2014). Métodos de prueba de suelo del sureste de los Estados Unidos. *Boletín de la Serie Cooperativa del Sur*, 419.
- Simón, M., Peralta, N., & Costa, J. L. (2013). Relationship between apparent electrical conductivity with soil properties and nutrients. *Ciencia del Suelo*, 31(1), 45-55.
- Stadtmüller, T. (1994). *Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales, medidas para mitigarlo: una revisión bibliográfica* (No. 10). Bib. Orton IICA/CATIE.
- Thiers, O., Reyes, J., Gerding, V., & Schlatter, J. E. (2014). Suelos en ecosistemas forestales. *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*, 133-178.
- Zúñiga, F. B. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Yucatán, México, Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.