

Universidad Pública de Navarra

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

**DETECCIÓN DE APROVECHAMIENTOS FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES
MULTITEMORALES DEL SATÉLITE SENTINEL-1**

Presentado por:

MARCO ANTONIO HERVÉS BLANCO (e)k

aurkeztua

Director:

JESÚS ÁLVAREZ MOZOS (e)k

Codirector:

JOSÉ ANTONIO SANZ DELGADO (e)k

**MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
*MASTERRA INFORMAZIO SISTEMA GEOGRAFIKOETAN ETA TELEDETEKZIOAN***

Septiembre, 2019 / 2019, iraila

RESUMEN

Con la finalidad de obtener información sobre los aprovechamientos forestales que se realizan en Navarra, en el presente documento se evaluará la capacidad del satélite radar Sentinel-1 para la detección de estos cambios. Los datos de partida utilizados han sido las autorizaciones de aprovechamientos que se han concedido en los años 2015 y 2016. Para realizar el estudio, se ha procedido a la extracción de la información por parcela y a la comparación de la retrodispersión en diferentes fechas, estudiando las variaciones existentes para cada tipo de aprovechamiento en las diferentes polarizaciones (VH, VV, VH/VV) y analizando su separabilidad. Finalmente, con la realización de un análisis multitemporal se ha procedido a identificar qué tipo de tratamiento se ha producido en cada parcela y en qué momento. Los resultados obtenidos muestran que la polarización VH puede ser un buen indicador para detectar cortas finales, aunque se aprecian diferencias significativas entre especies.

Palabras clave: teledetección, radar, Sentinel-1, análisis multitemporal, detección de cambios, aprovechamientos forestales, retrodispersión.

ABSTRACT

With the aim of obtaining information on the realization of forest harvest operations in Navarra, this work evaluates the ability of the Sentinel-1 radar satellite to detect these changes. Based on a dataset of forest harvest authorizations granted in 2015 and 2016, radar backscatter information has been extracted per plot. Then, by comparing the backscatter (in polarizations VH, VV and VH/VV) on different dates, the existing variations for each type of harvest have been studied, as well as their separability. Finally, a multitemporal analysis was carried out to identify the type of harvest performed on each plot and the date. The results obtained show that VH polarization can be a good indicator for detecting clearcuts, although significant differences were obtained for the different species.

Keywords: remote sensing, radar, Sentinel-1, multitemporal analysis, change detection, forest harvesting, backscatter.

ÍNDICE MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 TELEDETECCIÓN	1
1.3 TECNOLOGÍA RADAR Y SENTINEL 1	2
1.4 SENTINEL-1 EN MASAS FORESTALES	4
2. OBJETIVOS	5
3. MATERIALES	6
3.1 ZONA DE ESTUDIO	6
3.2 ESPECIES FORESTALES Y TIPO DE APROVECHAMIENTOS	7
3.3 IMÁGENES SENTINEL-1	8
4. METODOLOGÍA	11
4.1 PREPROCESADO DE LAS IMÁGENES	11
4.1.1 ELIMINACIÓN DEL RUIDO TÉRMICO	11
4.1.2 CREACIÓN DE MOSAICO (SLICE ASSEMBLY)	11
4.1.3 CORRECCIÓN DE LA ÓRBITA	11
4.1.4 CALIBRACIÓN A B°	11
4.1.5 FILTRADO DEL MOTEADO	12
4.1.6 CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA DE B° A Y° _{TF}	12
4.1.7 ORTORECTIFICACIÓN	12
4.2 PREPROCESADO DE LA BASE DE DATOS DE LAS PARCELAS	13
4.2.1 DESCARGA DE ARCHIVOS SHAPE	13
4.2.2 SELECCIÓN E UNIÓN DE LAS PARCELAS DE INTERÉS CON QGIS	13
4.2.3 ANÁLISIS, DIGITALIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS APROVECHAMIENTOS FORESTALES	14
4.3 EXTRACCIÓN DE ESTADÍSTICAS DE LAS PARCELAS FORESTALES	15
4.3.1 DATOS DE INTERÉS	15
4.3.2 MATRIZ DE DATOS	15
4.4 PROCESADO DE LOS DATOS	15
4.4.1 ESTUDIO I. ANÁLISIS BITEMPORAL	17
4.4.2 ESTUDIO II. ANÁLISIS BITEMPORAL POR ESPECIE	17
4.4.3 ESTUDIO III. ANÁLISIS MULTITEMPORAL	18
5. RESULTADOS	19
5.1 ESTUDIO I: ANÁLISIS BITEMPORAL	19
5.1.1 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN VH	19
5.1.1 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN VV	20

5.1.1 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN VH/VV	22
5.2 ESTUDIO II: ANÁLISIS BITEMPORAL POR ESPECIE	23
5.2.1 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN PINO ALEPO	23
5.2.2 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN ALERCE	24
5.2.3 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN CHOPO	25
5.2.4 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN ENCINA	26
5.2.5 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN HAYA	27
5.2.6 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN PINO LARICIO	28
5.2.7 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN OTRAS CONÍFERAS	29
5.2.8 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN OTRAS FRONDOSAS	30
5.2.1 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN PINO RADIATA	31
5.2.2 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN ROBLE AMERICANO	32
5.2.3 RETRODISPERSIÓN Y DISTANCIAS NORMALIZADAS EN PINO SILVESTRE	33
5.3 ESTUDIO III. ANÁLISIS MULTITEMPORAL	34
5.3.1 REPRESENTACIÓN DE LAS GRÁFICAS DE LA SERIE TEMPORAL PARA LAS DIFERENTES PARCELAS	34
5.3.2 REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DIAGRAMAS DE CAJA POR ESPECIE Y TIPO DE APROVECHAMIENTO FORESTAL REALIZADO	42
6. CONCLUSIONES	48
7. REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comarcas forestales de Navarra (izquierda); Localización de las parcelas de estudio (derecha).....	7
Figura 2. Huella satelital de la pasada ascendente 103ASC para la fecha 26/11/2018	9
Figura 3. Visualización de la zona norte de Navarra a partir de la banda VH de una imagen tomada con el satélite Sentinel-1B (la imagen se ve invertida, efecto que se corregirá tras su procesado)	9
Figura 4. Visualizada en falso color RGB (VV/VH/VV) de la superficie de Navarra de una imagen ya corregida de la fecha 10/05/2016	13
Figura 5. Digitalización de una parcela, parcela original (izda); imagen digitalizada (dcha).....	14
Figura 6. Distancia normalizada por meses para un periodo de un año en VH	19
Figura 7. Distancia normalizada por meses para un periodo de un año en VV	21
Figura 8. Distancia normalizada por meses para un periodo de un año en el ratio VH/VV.....	22
Figura 9. Distancia normalizada por meses para Pino Alepo	23
Figura 10. Distancia normalizada por meses para Alerce	24
Figura 11. Distancia normalizada por meses para Chopo	25
Figura 12. Distancia normalizada por meses para Encina.....	26
Figura 13. Distancia normalizada por meses para Haya	27
Figura 14. Distancia normalizada por meses para Pino Laricio	28
Figura 15. Distancia normalizada por meses para Otras coníferas	29
Figura 16. Distancia normalizada por meses para Otras Frondosas	30
Figura 17. Distancia normalizada por meses para Pino Radiata	31
Figura 18. Distancia normalizada por meses para Roble Americano	32
Figura 19. Distancia normalizada por meses para Pino Silvestre	33
Figura 20. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Pino Silvestre sin realización de aprovechamiento.....	34
Figura 21. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Silvestre sin aprovechamiento (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha).....	35
Figura 22. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Silvestre sin aprovechamiento	35
Figura 23. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Pino Silvestre con aprovechamiento de corta final.....	35
Figura 24. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Silvestre con aprovechamiento de corta final (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha).....	36
Figura 25. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Silvestre con aprovechamiento de corta final.....	36
Figura 26. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Roble Americano sin realización de aprovechamiento.....	36
Figura 27. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Roble Americano sin realización de aprovechamiento (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha).....	37
Figura 28. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Roble Americano sin aprovechamiento	37
Figura 29. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Roble americano con aprovechamiento de corta final.....	38
Figura 30. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Roble Americano con aprovechamiento de corta final (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha).....	38
Figura 31. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Roble Americano con aprovechamiento de corta final.....	38

Figura 32. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Pino Laricio con aprovechamiento de clara	39
Figura 33. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Laricio con aprovechamiento de clara (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)	39
Figura 34. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Laricio con aprovechamiento de clara	39
Figura 35. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Alerce con aprovechamiento de corta final.....	40
Figura 36. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Alerce con aprovechamiento de corta final (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)	40
Figura 37. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Alerce con aprovechamiento de corta final	40
Figura 38. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Encina con aprovechamiento de clara	41
Figura 39. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Encina con aprovechamiento de clara (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha).....	41
Figura 40. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Encina con aprovechamiento de clara	41
Figura 41. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Alepo.....	42
Figura 42. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Alerce.....	42
Figura 43. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Chopo.....	43
Figura 44. Diagramas de caja de la suma acumulada para la Encina	43
Figura 45. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Haya	44
Figura 46. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Laricio	44
Figura 47. Diagramas de caja de la suma acumulada para otras coníferas.....	45
Figura 48. Diagramas de caja de la suma acumulada para otras frondosas	45
Figura 49. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Radiata	46
Figura 50. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Roble Americano	46
Figura 51. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Silvestre	47

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comarcas forestales de Navarra</i>	6
<i>Tabla 2. Muestras disponibles por especie forestal y tipo de tratamiento</i>	8
<i>Tabla 3. Características del sensor Sentinel-1 en el modo operacional IW [25]</i>	8
<i>Tabla 4. Listado de fechas de adquisición de imágenes y el satélite desde donde han sido captadas</i>	10
<i>Tabla 5. Datos de partida para la extracción de los resultados</i>	16
<i>Tabla 6. Datos que se pretenden obtener del estudio</i>	16
<i>Tabla 7. Retrodispersión en VH para el conjunto de las parcelas</i>	19
<i>Tabla 8. Retrodispersión en VH para el conjunto de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	19
<i>Tabla 9. Retrodispersión en VV para el conjunto de las parcelas</i>	20
<i>Tabla 10. Retrodispersión en VV para el conjunto de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	21
<i>Tabla 11. Retrodispersión en el ratio VH/VV para el conjunto de las parcelas</i>	22
<i>Tabla 12. Retrodispersión en el ratio VH/VV para el conjunto de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	22
<i>Tabla 13. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Alepo</i>	23
<i>Tabla 14. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Alepo para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	23
<i>Tabla 15. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Alerce</i>	24
<i>Tabla 16. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Alerce para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	24
<i>Tabla 17. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Chopo</i>	25
<i>Tabla 18. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Chopo para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	25
<i>Tabla 19. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Encina</i>	26
<i>Tabla 20. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Encina para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	26
<i>Tabla 21. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Haya</i>	27
<i>Tabla 22. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Haya para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	27
<i>Tabla 23. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Laricio</i>	28
<i>Tabla 24. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Laricio para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	28
<i>Tabla 25. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras coníferas</i>	29
<i>Tabla 26. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras coníferas para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	29
<i>Tabla 27. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras frondosas</i>	30
<i>Tabla 28. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras frondosas para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	30
<i>Tabla 29. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Radiata</i>	31
<i>Tabla 30. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Radiata para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	31
<i>Tabla 31. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Roble Americano</i>	32
<i>Tabla 32. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Roble Americano para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	32
<i>Tabla 33. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Silvestre</i>	33
<i>Tabla 34. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Silvestre para parcelas superiores a 0,5 hectáreas</i>	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

Como recurso natural vital, los bosques proporcionan bienes y servicios valiosos para el bienestar humano, contribuyen a la captación de carbono y son esenciales para la conservación de hábitats naturales para la flora y la fauna [1]. En la actualidad, la deforestación y destrucción de los bosques es una causa importante de emisiones de carbono, y causa principal de la pérdida de biodiversidad [2]. En los últimos años, las tendencias de deforestación difieren en función de las regiones. Hay zonas donde se siguen perdiendo bosque a ritmo acelerado (Amazonia, Sudeste Asiático, África Central), debido entre otras causas a la transformación de tierras para uso agrícola, la ganadería o la extracción de maderas[3]; mientras que en otras regiones, por motivo del abandono de las zonas rurales, se está produciendo el efecto contrario en el que los bosque están ganando terreno [4].

En Navarra, los montes constituyen una parte esencial del patrimonio, ocupando un 55% de la superficie total de la comunidad. Dentro de esa superficie, se estima que el 62% pertenece a entidades públicas, mientras que el restante 38% correspondería a propietarios privados [5]. Debido a su importancia económica y ecológica, es necesario establecer normas para su gestión, para así poder compatibilizar la obtención de bienes materiales y ambientales a la vez que se pueda aumentar y mejorar la calidad de su biodiversidad y conservación [5]. Con la finalidad de dar un valor añadido a los montes, el Gobierno de Navarra ha decidido implantar el sistema de certificación forestal PEFC (Programa de reconocimiento de Sistemas de Certificación Forestal). De este modo, con este sello se garantiza que la gestión forestal que se lleva a cabo en los montes cumple con los criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social, y los productos que se extraigan de estas zonas, serán identificados como productos sostenibles [6].

En Navarra, cuando hablamos de la extracción de productos maderables y leñosos en la propiedad privada, el propietario particular tiene que realizar una solicitud al Gobierno de Navarra para conseguir una autorización que le permita realizar aprovechamientos forestales en su parcela. Si se autoriza a realizar dichos trabajos, esta autorización tendrá una vigencia de dos años a partir de su emisión. De este modo, el gobierno mantiene el registro de las solicitudes de aprovechamientos forestales que se han realizado. Sin embargo, de todas las autorizaciones, muchas de ellas no se llevan a cabo, creando de este modo un desconocimiento de información, por parte del gobierno, de la superficie real donde se han realizado los aprovechamientos forestales. Estos datos son de gran valor tanto a nivel económico como para el seguimiento de los bosques y la realización de estimaciones de superficie y de volumen de madera que se extrae en la comunidad. Esta información también es necesaria para poder continuar en el sistema de certificación PEFC. Por todo ello, es de vital importancia conocer la superficie real de masas forestales donde se han realizado aprovechamientos.

1.2 TELEDETECCIÓN

En las últimas décadas, la observación y obtención de información del planeta Tierra desde el espacio ha vivido un extraordinario progreso, convirtiéndose en la actualidad en una herramienta fundamental para el estudio y seguimiento de los cambios terrestres. Esto incluye actividades que

generan un gran impacto ambiental en el planeta, como pueden ser, la desertificación, la deforestación o el cambio climático [7].

El término “teledetección” procede de la traducción latina del término “remote sensing” [7]. Como define James B. Campbell y Randolph H. Wynne en el libro “Introduction to Remote Sensing” [8], la teledetección es la ciencia y el arte de adquirir información sobre un objeto, área o fenómeno usando imágenes adquiridas en múltiples formatos, como pueden ser ondas sonoras, ondas sísmicas, fuerza gravitacional o energía electromagnética. En este trabajo, nuestro interés se basará en sensores de energía electromagnética.

Una de las maneras más comunes para clasificar los sensores electromagnéticos es según el mecanismo utilizado para detectar la energía. Por una parte, existen los sensores pasivos que obtienen la radiación electromagnética de una fuente externa de energía; esta puede provenir de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre o por la propia radiación emitida por los objetos. La mayoría de los sensores pasivos recogen simultáneamente datos en diferentes bandas del espectro electromagnético (sensores multiespectrales), proporcionando de este modo, una amplia información sobre el estado del medio observado. Sin embargo, al depender de fuentes externas de energía y al trabajar en longitudes de onda cortas, estos sensores se ven muy afectados por las condiciones climáticas [9].

También existen los sensores activos, los cuales tienen la capacidad de emitir su propia fuente de energía que, tras ser reflejada en la superficie observada, reciben el eco o retorno. El Radar (Radio Detection And Ranging, también denominados SAR, del inglés Synthetic Aperture Radar) es uno de los sistemas de sensor activo más conocido, opera en la región del espectro electromagnético de las microondas, de 0.1 cm a 1 m; obteniendo para cada pixel de una imagen su coeficiente de retrodispersión. Una de las principales ventajas de estos sensores es que, al trabajar en la región del microondas, no se ven afectados por las condiciones atmosféricas a la hora de la adquisición de las imágenes [9].

1.3 TECNOLOGÍA RADAR Y SENTINEL 1

Hasta la actualidad, en la mayor parte de los casos, se han empleado sensores ópticos para la observación de las masas forestales a nivel global [10], [11]. Sin embargo, el uso de sensores ópticos para realizar este tipo de monitoreo conlleva una serie de desventajas. Una de ellas es que, este tipo de sensores no son sensibles a las características geométricas de los objetos, es decir, no influye la forma o el tamaño de los objetos observados. La información que se obtiene de las cubiertas vegetales es su reflectancia, y ésta depende esencialmente de su composición (e.g., pigmentación o contenido de humedad). Por otra parte, para la realización de estudios multitemporales, la presencia de nubosidad u otro tipo de componentes en la atmosfera, dispersan la radiación, impidiendo de este modo la obtención de información en determinadas fechas que en muchos casos podría ser crucial [12].

Una alternativa para superar las desventajas de los sensores ópticos, es el uso de sensores radar. Este tipo de tecnología, tiene una fuerte sensibilidad a la estructura del bosque y de la biomasa, sin verse afectada por la cobertura de nubes ni por las condiciones de iluminación solar, lo que facilita una obtención de datos multitemporales consistentes [13]. Como ya se ha mencionado, los sensores SAR

operan en la región del espectro electromagnético de las microondas, transmitiendo un pulso sobre la superficie de la tierra y recibiendo su retorno. El pulso retrodispersado en superficies forestales se ve afectado por factores relacionados con la biomasa, la estructura y el suelo, por ello, tanto el contenido en agua de la vegetación [12], como la humedad o rugosidad del suelo [14], son factores clave a tener en cuenta ya que modifican el valor de la retrodispersión. Por otra parte, las propiedades del sensor también son un punto clave a tener en cuenta, ya que en función de la banda en que opere, el ángulo de incidencia del pulso y el tipo de polarización que se utilice, el contacto y comportamiento del pulso con los objetos observados varía considerablemente [15].

El ángulo de incidencia es el ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la normal de la superficie de la Tierra. Este ángulo varía a lo largo de la dirección del alcance y por efecto del relieve, por este motivo, se producen variaciones en la geometría dentro de una misma imagen. El ángulo de incidencia afecta a la retrodispersión que se va a producir, ya que en general, cuanto menor sea, mayor será la retrodispersión. Otro de los factores en los que afecta este ángulo es en la capacidad de penetración del pulso en las cubiertas observadas, puesto que, cuanto más pequeño sea dicho ángulo, el pulso tendrá más capacidad de penetración.

En relación a las bandas, actualmente los sensores SAR operativos están operando en 3 bandas distintas. En primer lugar, la banda L, tiene una frecuencia baja y por ello una longitud de onda larga, lo que le permite tener una mayor profundidad de penetración sobre los objetos y una interacción con los elementos de mayor tamaño de las cubiertas vegetales (troncos, ramas gruesas, etc.). Un ejemplo de satélites que trabajan en esta banda son ALOS-2 / PALSAR-2 o SAOCOM. La segunda banda en la que trabajan los sensores SAR es la banda C, con una longitud de onda media, la cual, tiene una capacidad moderada de penetración, produciéndose la interacción con elementos de menor tamaño (principalmente ramas). RADARSAT-1 y -2, Sentinel-1 o RCM son ejemplos de satélites que operan en esta banda. Hay sensores SAR que operan en la banda X, es decir, con longitud de onda corta, lo que significa que tienen muy poca capacidad de penetración sobre los objetos observados y que interactúan con elementos pequeños de las cubiertas (como hojas, inflorescencias, etc.). Ejemplos de estos sensores son el TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed o PAZ SAR.

Cuando hablamos de la polarización, nos referimos a la orientación del campo eléctrico de la radiación electromagnética. Existen dos tipos de polarización distintas: polarización directa y polarización cruzada. La polarización directa es cuando se emite y se recibe el pulso electromagnético en la misma polarización; puede ser vertical (VV) u horizontal (HH). La polarización cruzada por el contrario emite el pulso en una determinada orientación y lo recibe en la orientación perpendicular (VH o HV). Las distintas polarizaciones son sensibles a distintos fenómenos de retrodispersión como la retrodispersión de volumen (VH o HV), la retrodispersión superficial (HH y VV) o la de doble rebote (HH Y VV).

Hasta hace pocos años, el uso de sensores de la banda L, eran los más utilizados para el seguimiento de masas forestales [16]; en especial, existen variedad de estudios con el satélite ALOS PALSAR [2], [17], [18]. El mayor uso de la banda L, fue entre otras cosas debido a que el monitoreo de masas forestales utilizando la banda C se vio obstaculizado, hasta hace pocos años, por la falta de disponibilidad de datos de series temporales de alta resolución espacial y temporal [16].

El programa Copernicus, liderado por la Comisión Europea (CE) en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), tiene como objetivo proporcionar servicios para conseguir una mejor gestión del medio ambiente, analizar y reducir los efectos que provocan el cambio climático y asegurar la seguridad ciudadana [19]. Por ello, realizó el lanzamiento de los satélites Sentinel-1A (abril de 2014) y Sentinel-1B (abril de 2016), los cuales operan con sensores SAR de banda C, proporcionando de este modo, una oportunidad única de monitoreo de masas forestales, con un ciclo repetido de 6 a 12 días según el tipo de dato o la región de trabajo [16]. Sentinel-1, en general, proporciona información en polarización directa (VV) y en polarización cruzada (VH), y su continuidad de datos está garantizada hasta 2030, lo que permite un seguimiento de la superficie terrestre a largo plazo [12]. Tras el lanzamiento de estos dos satélites, nuevos autores utilizaron los datos ofrecidos por Sentinel-1 para la realización de diversos estudios sobre el monitoreo de los bosques [12], [16].

1.4 SENTINEL-1 EN MASAS FORESTALES

Como se ha mencionado anteriormente, las características del sensor afectan en gran medida a su reacción con el objeto observado. En masas forestales, la frecuencia en la que opera Sentinel-1, permite una penetración media en las copas de los árboles, devolviendo de este modo una retrodispersión de las ramas de tamaño medio [20]. También debemos tener en cuenta la polarización de las ondas de radar que interactúan con las masas forestales, ya que esto determinará el comportamiento de la señal con las copas y los troncos. En nuestro caso, Sentinel-1 dispone tanto de polarización directa como polarización cruzada, observándose que, para el seguimiento de biomasa, deforestación y degradación forestal, el uso de la polarización cruzada proporciona unos mejores resultados [20]. El ángulo de incidencia influye fuertemente en la retrodispersión de la señal: en laderas orientadas al sensor, se obtendrá una retrodispersión más fuerte, mientras que, en laderas opuestas, la retrodispersión será más débil. Esta retrodispersión también se ve afectada por las características particulares de la cubierta, reduciendo su efecto donde hay masas forestales más densas y acentuándolo en zonas con poca vegetación. En el modo operacional Interferometric Wide-swath mode, Sentinel-1 trabaja con ángulos de entre 31 a 46 grados [20].

También debemos tener en cuenta factores externos en la toma de imágenes, como la estructura de las masas o el contenido en humedad. Este último es de especial importancia, ya que los sensores SAR son muy sensibles a la humedad en los suelos, en la vegetación y en zonas de agua estancada, tendiendo a aumentar la señal de retrodispersión proporcionalmente al contenido de agua presente [20]. Por ello, la gran importancia del uso de imágenes adquiridas bajo condiciones climáticas lo más similares posible para mejorar la precisión de las estimaciones [21].

Existen diversos estudios para determinar el potencial de Sentinel-1 a la hora de operar en masas forestales. Para el monitoreo de bosques templados en las diferentes estaciones los resultados obtenidos han sido muy favorables [22], incluso se ha logrado una clasificación de los bosques en coníferas y frondosas con una precisión del 86% [12]. Otro trabajo se centró en la detección de daños en bosques producidos por la nieve, obteniendo una precisión del 90% [23], y también, se ha demostrado la capacidad de detectar áreas quemadas de manera rápida y precisa [24].

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo se centra en evaluar la posibilidad de detección de aprovechamientos forestales a partir de información obtenida por imágenes radar multitemporales del satélite Sentinel-1 en modo Interferometric Wide-swath mode (IW). Se van a analizar dos tipos de aprovechamientos forestales, en primer lugar las cortas finales, que consisten en la extracción total y de una sola vez de todos los árboles de una parcela; y en segundo lugar se analizarán las claras, que se basan en la extracción parcial de árboles en una parcela para favorecer el crecimiento y desarrollo de los árboles restantes.

La finalidad será evaluar la capacidad que tiene este sensor, que opera en la banda C, para identificar los cambios que se producen en las masas forestales privadas que se localizan dentro de la Comunidad Foral de Navarra. La información de la que partimos son las autorizaciones de aprovechamientos forestales que el Gobierno de Navarra ha concedido entre los años 2015 y 2016 a los propietarios particulares y que están repartidas por todo el territorio navarro.

Para realizar este estudio, observaremos el comportamiento de la retrodispersión en las polarizaciones VH, VV y en el ratio VH/VV entre la fecha inicial en 2014 y fecha final en 2018, para así, determinar si hay diferencias de retrodispersión tras la realización de los trabajos de aprovechamiento. También se realizará un análisis de separabilidad empleando la distancia normalizada en distintos meses del año. Por otro lado, se pretende identificar por parcela, qué tipo de aprovechamiento forestal se ha producido y en qué momento, a partir del análisis de la serie temporal completa. Todos estos resultados también se analizarán para cada especie forestal por separado.

3. MATERIALES

3.1 ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio donde se va a realizar el análisis para la detección de los aprovechamientos forestales corresponde a las autorizaciones que el Gobierno de Navarra ha otorgado en los años 2015 y 2016, para la realización de dichos aprovechamientos forestales. Abarca 915 parcelas distribuidas en 88 municipios de la Comunidad Foral de Navarra (figura 1). El conjunto de las parcelas suma una superficie total de 10.369,89 hectáreas.

La alta variabilidad climática, orográfica y edafológica, hace que los sistemas forestales sean muy variados. Debido a estas diferencias, Navarra se divide en 3 comarcas forestales (tabla 1). Por una parte está la zona nororiental de la comunidad (Comarca Pirenaica), caracterizada por un relieve montañoso y por temperaturas muy extremas donde las nieves en temporada de invierno son abundantes; en estas condiciones, los bosques están compuestos principalmente por pino silvestre, existiendo también zonas de hayedo y de abeto. En la zona noroccidental de Navarra (Comarca Cantábrica), las precipitaciones son abundantes y las temperaturas son más templadas; por ello, los bosques que se encuentran en esa zona son bosques atlánticos mixtos, existiendo gran cantidad de hayedos y robledales, junto con repoblaciones de coníferas con carácter productor como puede ser el pino radiata. En el centro y sur de Navarra (Comarca zona media y Ribera), el clima es mucho más moderado, siendo más seco y árido conforme nos desplazamos hacia el sur; las masas forestales presentes en estas zonas están compuestas principalmente por robledales mediterráneos, encinas y pino alepo, y como carácter más productor, existen repoblaciones de pino laricio en la zona media y chopo más hacia el sur de la provincia.

Tabla 1. Comarcas forestales de Navarra

COMARCAS FORESTALES DE NAVARRA				
COMARCA	NOMBRE	SUPERFICIE (ha)	NÚMERO PARCELAS	SUPERFICIE PARCELAS
I	CANTÁBRICA	186.883,81	480	5.183,16
II	PIRENAICA	231.192,96	222	2.320,16
III	ZONA MEDIA Y RIBERA	621.083,16	213	2.866,57
TOTAL	AGRUPACIÓN DE LAS 3 COMARCAS	1.039.159,93	915	10.369,89

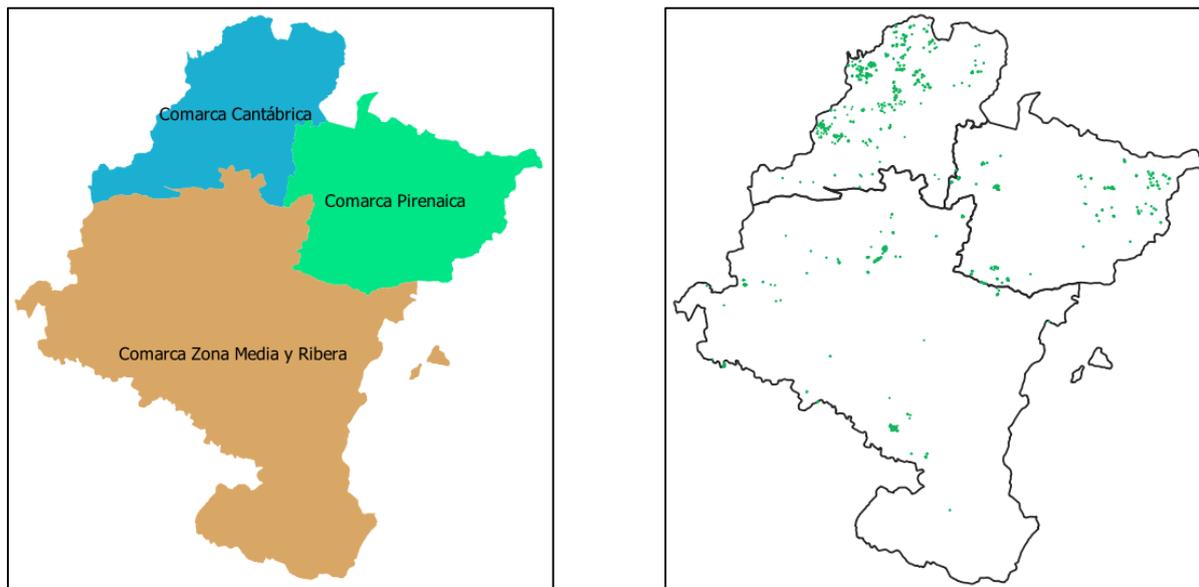


Figura 1. Comarcas forestales de Navarra (izquierda); Localización de las parcelas de estudio (derecha)

3.2 ESPECIES FORESTALES Y TIPO DE APROVECHAMIENTOS

Las especies forestales con las que vamos a realizar el estudio son las que se obtuvieron del archivo del Gobierno de Navarra de las autorizaciones de aprovechamientos forestales para los años 2015-2016. La elección de estos años ha sido debida a que desde el momento en que se autoriza el aprovechamiento, el propietario tiene un periodo de vigencia de dos años para realizar la extracción de la madera. Por esta razón no se ha considerado conveniente analizar las autorizaciones de 2017 y 2018 ya que en la mayoría de los casos aún no van a estar realizados los trabajos. No obstante, a dicho archivo se le ha tenido que realizar un tratamiento de los datos para adaptarlo a las necesidades del estudio. Este tratamiento se explicará posteriormente dentro de la sección de metodología, en el apartado de procesado de la base de datos. Tras tener preparado el archivo, obtenemos una lista con 11 clases diferentes (tabla 2).

También realizaremos un estudio según del tipo de aprovechamiento que se haya realizado a la masa forestal (tabla 2). En este caso, lo dividiremos en 3 tipos distintos de aprovechamientos. Tal y como se ha adelantado, la corta final consiste en eliminar todos los pies de la parcela en una única intervención. La clara consiste en eliminar los pies arbóreos dejando los más vigorosos (extracción de entre un 20% y 50% de la masa total), con la finalidad de reducir el número de pies por hectárea para disminuir la competencia y así beneficiar y anticipar el crecimiento de los pies restantes. Por último, tenemos parcelas donde no se ha realizado ningún tipo de aprovechamiento, que denominaremos como no realizado.

Tabla 2. Muestras disponibles por especie forestal y tipo de tratamiento

ESPECIE FORESTAL	NÚMERO DE PARCELAS SEGÚN TIPO DE APROVECHAMIENTO REALIZADO			TOTALES POR ESPECIE
	CORTA FINAL	CLARA	NO REALIZADO	
PINO ALEPO	0	15	11	26
ALERCE	19	7	17	43
CHOPO	57	0	49	106
ENCINA	0	9	18	27
HAYA	0	7	16	23
PINO LARICIO	9	75	33	117
PINO RADIATA	164	26	90	280
ROBLE AMERICANO	25	18	39	82
PINO SILVESTRE	47	44	91	182
OTRAS CONIFERAS	5	1	3	9
OTRAS FRONDOSAS	3	2	15	20
TOTAL:	329	204	382	915

3.3 IMÁGENES SENTINEL-1

Para la realización de este estudio se han empleado todas las imágenes disponibles entre las fechas 24/10/2014 y 30/06/2019, tanto de Sentinel-1A como de Sentinel-1B, en modo Interferometric Wide Swath (IW) (tabla 3), seleccionando las imágenes de la pasada ascendente 103ASC, debido a que es la pasada que mejor se adapta a la extensión de Navarra al poder cubrir todo el territorio con dos imágenes. Se obtiene de este modo, información en 181 fechas diferentes (tabla 4).

Las imágenes han sido descargadas en nivel 1.5 Ground Range Detected (GRD), con polarización en VH y VV. Cabe destacar que estas imágenes son de distribución gratuita, solo es necesario registrarse como usuario para poder descargarlas.

Tabla 3. Características del sensor Sentinel-1 en el modo operacional IW [25]

PARÁMETROS	Interferometric Wide-swath mode (IW)
Polarización	Dual (VV+VH)
Ángulo de incidencia	31° - 46°
Resolución en azimuth	20 m
Resolución en ground range	5 m
Looks	Único
Ancho de pasada	250 km
Ruido máximo equivalente Sigma cero (NESZ)	-22dB
Estabilidad radiométrica	0.5 dB (3σ)
Precisión radiométrica	1 dB (3σ)
Error de fase	5°

Desde la página web de la ESA, “Copernicus Open Acces Hub”, podemos observar la huella satelital de la pasada ascendente 103ASC, donde se aprecia que con dos imágenes se cubre todo el territorio de Navarra (figura 2).



Figura 2. Huella satelital de la pasada ascendente 103ASC para la fecha 26/11/2018

En la figura 3 se muestra la banda VH de una imagen previa al procesado perteneciente a la zona norte de Navarra del satélite Sentinel-1B en modo IW y nivel 1.5 GRD para la fecha 26/11/2018, visualizada desde el software libre SNAP.



Figura 3. Visualización de la zona norte de Navarra a partir de la banda VH de una imagen tomada con el satélite Sentinel-1B (la imagen se ve invertida, efecto que se corregirá tras su procesado)

Se disponen de todas las fechas entre el 24/10/2014 y el 30/06/2019 donde se han podido obtener imágenes del satélite Sentinel-1A o Sentinel-1B (tabla 4). Podemos observar que como Sentinel-1B fue lanzado en 2016, empezamos a tener imágenes de él a partir de septiembre de ese mismo año. También se puede apreciar que, a partir de mayo de 2018 y hasta la actualidad, no se encuentran disponibles imágenes de Sentinel-1A por motivos que se desconocen. El periodo de revisita tanto de Sentinel-1A como de Sentinel-1B es de 12 días, y entre ellos es de 6 días; por ello, la periodicidad de las fechas donde tenemos imágenes varía entre 6 y 12 días según si están operando los dos satélites o solo uno.

Tabla 4. Listado de fechas de adquisición de imágenes y el satélite desde donde han sido captadas

FECHA	SATÉLITE	FECHA	SATÉLITE	FECHA	SATÉLITE	FECHA	SATÉLITE
24/10/2014	S1A	15/06/2016	S1A	11/05/2017	S1B	11/02/2018	S1B
05/11/2014	S1A	27/06/2016	S1A	17/05/2017	S1A	17/02/2018	S1A
17/11/2014	S1A	09/07/2016	S1A	23/05/2017	S1B	23/02/2018	S1B
29/11/2014	S1A	21/07/2016	S1A	29/05/2017	S1A	01/03/2018	S1A
11/12/2014	S1A	02/08/2016	S1A	04/06/2017	S1B	07/03/2018	S1B
23/12/2014	S1A	14/08/2016	S1A	10/06/2017	S1A	13/03/2018	S1A
04/01/2015	S1A	26/08/2016	S1A	16/06/2017	S1B	25/03/2018	S1B
16/01/2015	S1A	07/09/2016	S1A	22/06/2017	S1A	31/03/2018	S1A
09/02/2015	S1A	19/09/2016	S1A	28/06/2017	S1B	06/04/2018	S1B
21/02/2015	S1A	01/10/2016	S1A	04/07/2017	S1A	12/04/2018	S1A
05/03/2015	S1A	07/10/2016	S1B	10/07/2017	S1B	24/04/2018	S1B
17/03/2015	S1A	13/10/2016	S1A	16/07/2017	S1A	06/05/2018	S1B
29/03/2015	S1A	19/10/2016	S1B	22/07/2017	S1B	18/05/2018	S1B
10/04/2015	S1A	25/10/2016	S1A	28/07/2017	S1A	30/05/2018	S1B
22/04/2015	S1A	31/10/2016	S1B	03/08/2017	S1B	11/06/2018	S1B
04/05/2015	S1A	06/11/2016	S1A	09/08/2017	S1A	23/06/2018	S1B
16/05/2015	S1A	12/11/2016	S1B	15/08/2017	S1B	05/07/2018	S1B
28/05/2015	S1A	18/11/2016	S1A	21/08/2017	S1A	17/07/2018	S1B
09/06/2015	S1A	24/11/2016	S1B	27/08/2017	S1B	29/07/2018	S1B
03/07/2015	S1A	30/11/2016	S1A	02/09/2017	S1A	10/08/2018	S1B
15/07/2015	S1A	06/12/2016	S1B	08/09/2017	S1B	22/08/2018	S1B
27/07/2015	S1A	12/12/2016	S1A	14/09/2017	S1A	03/09/2018	S1B
08/08/2015	S1A	18/12/2016	S1B	20/09/2017	S1B	15/09/2018	S1B
20/08/2015	S1A	24/12/2016	S1A	26/09/2017	S1A	27/09/2018	S1B
01/09/2015	S1A	30/12/2016	S1B	02/10/2017	S1B	09/10/2018	S1B
13/09/2015	S1A	05/01/2017	S1A	08/10/2017	S1A	21/10/2018	S1B
25/09/2015	S1A	11/01/2017	S1B	14/10/2017	S1B	02/11/2018	S1B
07/10/2015	S1A	17/01/2017	S1A	20/10/2017	S1A	14/11/2018	S1B
31/10/2015	S1A	23/01/2017	S1B	26/10/2017	S1B	26/11/2018	S1B
12/11/2015	S1A	29/01/2017	S1A	01/11/2017	S1A	08/12/2018	S1B
24/11/2015	S1A	04/02/2017	S1B	07/11/2017	S1B	20/12/2018	S1B
06/12/2015	S1A	10/02/2017	S1A	13/11/2017	S1A	01/01/2019	S1B
18/12/2015	S1A	16/02/2017	S1B	19/11/2017	S1B	13/01/2019	S1B
30/12/2015	S1A	22/02/2017	S1A	25/11/2017	S1A	25/01/2019	S1B
11/01/2016	S1A	28/02/2017	S1B	01/12/2017	S1B	18/02/2019	S1B
23/01/2016	S1A	06/03/2017	S1A	07/12/2017	S1A	02/03/2019	S1B
04/02/2016	S1A	12/03/2017	S1B	13/12/2017	S1B	26/03/2019	S1B
16/02/2016	S1A	18/03/2017	S1A	19/12/2017	S1A	07/04/2019	S1B
28/02/2016	S1A	24/03/2017	S1B	25/12/2017	S1B	19/04/2019	S1B
11/03/2016	S1A	30/03/2017	S1A	31/12/2017	S1A	01/05/2019	S1B
23/03/2016	S1A	05/04/2017	S1B	06/01/2018	S1B	25/05/2019	S1B
04/04/2016	S1A	11/04/2017	S1A	12/01/2018	S1A	06/06/2019	S1B
16/04/2016	S1A	17/04/2017	S1B	18/01/2018	S1B	18/06/2019	S1B
28/04/2016	S1A	23/04/2017	S1A	24/01/2018	S1A	30/06/2019	S1B
10/05/2016	S1A	29/04/2017	S1B	30/01/2018	S1B		
03/06/2016	S1A	05/05/2017	S1A	05/02/2018	S1A		

4. METODOLOGÍA

4.1 PREPROCESADO DE LAS IMÁGENES

A la hora de descargar las imágenes Sentinel-1, éstas se encuentran con un nivel de procesado GRD y en unidades de amplitud codificada en niveles digitales de 16 bits, tanto para la polarización en VV como en VH. El procesado consiste en transformar estos datos en coeficientes de retrodispersión en unidades de decibelios y darles una referencia geográfica. Para ello, se les aplicarán correcciones radiométricas, geométricas y topográficas. Todo el procesado se ha realizado mediante el Software libre SNAP, operando desde una consola Python. El proceso, ha sido realizado y facilitado por el grupo de investigación THERRAE y los pasos que se han seguido han sido los siguientes:

4.1.1 Eliminación del ruido térmico

En algunas ocasiones los propios componentes del satélite generan una leve emisión debido a su temperatura, que afecta a las medidas de los detectores del sensor. Este efecto es más notorio en zonas donde la retrodispersión es muy baja, como pueden ser masas de agua. En los metadatos asociados a la imagen, tendremos la información necesaria para saber si este efecto se encuentra ya corregido. En el caso de las imágenes con las que estamos trabajando, el ruido térmico no está corregido, por ello, se realizaran las correcciones tanto en la polarización VV como en VH.

4.1.2 Creación de mosaico (Slice assembly)

Como se ha mencionado anteriormente, para cubrir todo el territorio de Navarra se necesitan dos imágenes para cada fecha: una de la zona norte de la comunidad foral y otra de la zona sur. En esta parte del procesado, se realizará la unión de estas dos imágenes para cada fecha, con la finalidad de crear una imagen que contenga toda la superficie de Navarra.

4.1.3 Corrección de la órbita

En los metadatos asociados a la imagen, se encuentran los datos de la órbita del sensor en el momento de la adquisición de la imagen; estos datos orbitales son aproximados ya que se calculan a tiempo real. Días o semanas más tarde de la generación del producto, se pueden descargar los datos orbitales reprocesados. Para garantizar una corrección geométrica precisa, es conveniente descargar estos nuevos datos reprocesados.

4.1.4 Calibración a β^0

En este proceso de calibración, se realizará una transformación de las unidades de las imágenes, pasando de niveles digitales a valores de coeficiente de retrodispersión β^0 . Este paso es necesario para poder identificar e interpretar los diferentes mecanismos de retrodispersión que se producen en la imagen; de este modo, se puede analizar las diferencias en retrodispersión según las características del terreno. Este proceso también es esencial para estudios multitemporales.

4.1.5 Filtrado del moteado

El moteado (speckle) es una distorsión radiométrica que sufren todas las imágenes radar. Por su aspecto también se le llama efecto sal y pimienta. Este efecto dificulta la interpretación y posterior análisis de las imágenes, ya que introduce variabilidad en los valores de cada pixel. El proceso de eliminación de esta distorsión en imágenes SAR es esencial, se debe aplicar un filtro que elimine el moteado sin sacrificar la estructura de la imagen [26]. Para realizar este proceso, se han desarrollado diferentes filtros adaptativos diseñados con distintas funciones, como puede ser la de preservar elementos discretos (Filtro de Lee y de Frost) [27], mantener las texturas (Filtro Gamma-MAP) [27] o enfocarse más en conservar los bordes (Refined Lee, Lee Sigma e IDAN) [28].

Para la realización de este estudio, el mayor interés es la conservación de las texturas, por ello, se ha escogido el filtro Gamma-MAP con una ventana de 3x3. Este filtro adaptativo es efectivo para reducir el moteado y preservar la linealidad de los bordes.

4.1.6 Corrección topográfica de β^0 a γ^0_{TF}

El relieve, entendido como la pendiente y orientación del terreno, modifica tanto la geometría de la imagen como también su radiometría, creando un efecto en el que las laderas orientadas al sensor el coeficiente de retrodispersión aumente, mientras que en las laderas opuestas se vea reducido. Para corregir este efecto, se ha realizado el proceso denominado Terrain Flattening [29], el cual consiste en la normalización radiométrica del efecto del relieve en el coeficiente de retrodispersión, obteniendo como resultado datos de coeficiente de retrodispersión en magnitud γ^0_{TF} en los que ya no se aprecia el efecto del relieve.

4.1.7 Ortorectificación

Existen desviaciones geométricas en las imágenes producidas por distorsiones del sensor y la superficie de la tierra. Las principales distorsiones son debidas a el rango oblicuo, la inversión del relieve, la sombra y el desplazamiento en contra del nadir. En este proceso se va a transformar la imagen a una proyección cartográfica precisa, y, debido a la influencia del relieve, es necesario contar con un modelo digital de elevaciones (DEM) con una resolución similar a la imagen a corregir. Este tratamiento debe hacerse con modelos matemáticos rigurosos que tengan en cuenta la posición del sensor, la geometría de la adquisición y el relieve. Se suelen emplear diferentes modelos para ortorectificar las imágenes. En este caso, el modelo empleado es el Range-Doppler, que resuelve matemáticamente las ecuaciones del rango y del efecto Doppler para obtener la posición precisa de cada punto de la imagen [30].

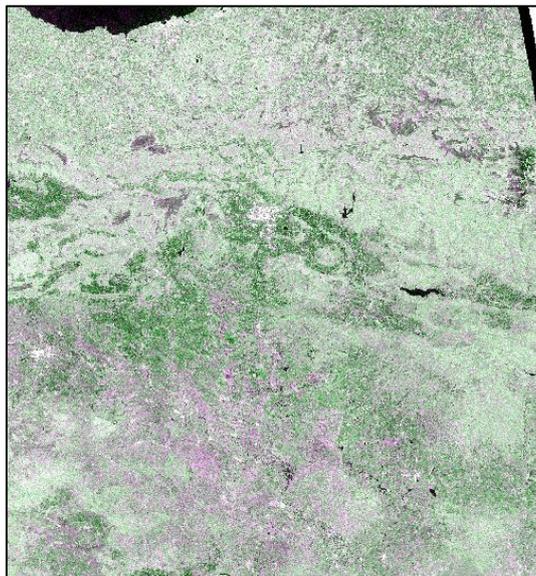


Figura 4. Visualizada en falso color RGB (VV/VH/VV) de la superficie de Navarra de una imagen ya corregida de la fecha 10/05/2016

4.2 PREPROCESADO DE LA BASE DE DATOS DE LAS PARCELAS

Como ya se ha mencionado anteriormente, para la realización de este estudio se han utilizado los datos de las autorizaciones de aprovechamientos forestales proporcionados por el departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente del Gobierno de Navarra de los años 2015 y 2016. Dicho fichero, en formato XLXS (Microsoft Excel Open XML Spreadsheet), contiene información de cada parcela, de la que cabe destacar su referencia catastral (municipio, polígono, parcela), tipo de aprovechamiento que se va a realizar, nombre de la especie forestal y volumen de madera que se pretende extraer.

Para saber en qué situación se encuentra cada parcela, se ha tenido que realizar un análisis visual con ortofoto en el software libre información geográfica QGIS, utilizando la siguiente metodología:

4.2.1 Descarga de archivos Shape

Descarga a partir de la página web del Sistema de Información Territorial de Navarra (SITNA), de los archivos Shape de los municipios donde se han concedido autorizaciones de aprovechamientos forestales en los años 2015 y 2016.

4.2.2 Selección e unión de las parcelas de interés con QGIS

Utilizando QGIS, se han cargado las capas de parcelas rústicas para cada municipio. De ellas, a partir de la información ofrecida por el Gobierno de Navarra (número de polígono y parcela) y la tabla de atributos de dicha capa, se han seleccionado las parcelas de cada municipio donde se han concedido autorizaciones, las cuales, se han unificado en un nuevo archivo Shape. Al realizar este procedimiento, se han detectado anomalías en la información que había proporcionado el Gobierno, las cuales se solventaron contactando con el encargado de gestionar esa información en el Gobierno de Navarra.

4.2.3 Análisis, digitalización y clasificación de los aprovechamientos forestales

Para realizar este proceso, se ha utilizado el servicio Web Map Service (WMS) de IDENA. Desde QGIS se ha hecho una llamada a las capas de las ortofotos de los años 2008–2014–2017 y 2018, que son las que se han utilizado como referencia.

Una vez que ya se dispone de las ortofotos, el fichero base con la información del Gobierno de las solicitudes autorizadas y el Shape con las parcelas de interés, se ha procedido a analizar, digitalizar y clasificar cada parcela.

La sistemática que se ha utilizado para el desarrollo de este proceso ha sido en primer lugar identificar la parcela en QGIS, observar en el fichero base la información de la solicitud (tipo de aprovechamiento, volumen estimado y especie forestal) y realizar las comparaciones en las diferentes ortofotos para verificar si efectivamente se ha realizado el aprovechamiento. En las parcelas en las que sí se había realizado, se ha indicado el tipo de aprovechamiento efectuado y posteriormente se ha digitalizado su perímetro, para así, conocer su superficie exacta, ya que en ocasiones el aprovechamiento no se realiza en toda la superficie de la parcela, y otras veces, se excede de los límites de la misma. Toda esta información queda registrada para así conocer la situación real de cada parcela.

En la figura 5 se muestra un ejemplo del proceso de digitalización de una parcela, donde en la imagen de la izquierda se observa la parcela original sobre la ortofoto de 2008, y en la imagen de la derecha, podemos visualizar la misma parcela ya digitalizada sobre la ortofoto de 2018. En este caso, se ha dividido en dos polígonos, uno donde se ha realizado una corta final y otro donde no. Por el color de la vegetación en la ortofoto de 2008, se puede apreciar que el aprovechamiento se ha realizado sobre una plantación de chopo.



Figura 5. Digitalización de una parcela, parcela original (izda); imagen digitalizada (dcha)

4.3 EXTRACCIÓN DE ESTADÍSTICAS DE LAS PARCELAS FORESTALES

4.3.1 Datos de interés

Para este estudio, con el propósito de tener un valor representativo de cada parcela, se ha decidido extraer de las estadísticas los datos de media, así como su desviación estándar para identificar fácilmente valores anómalos que pudiesen existir.

De forma semejante a los índices de vegetación derivados de las observaciones multiespectrales en el óptico, es posible realizar combinaciones aritméticas con los distintos canales de polarización para obtener índices que resulten más sensibles a una determinada característica de la cubierta.

El ratio de polarización directa (HH/VV) es sensible tanto a la humedad del suelo como a su rugosidad, mientras que el ratio de polarización cruzada (VH/VV o q) es prácticamente insensible a la humedad del suelo pero está muy influenciado por la rugosidad, y en zonas boscosas está muy relacionado con la cantidad de vegetación o biomasa existente. Para este estudio, se ha decidido trabajar con el ratio de polarización cruzada, su fórmula en unidades de dB es la siguiente:

$$q = \sigma_{VH}^0 - \sigma_{VV}^0$$

4.3.2 Matriz de datos

Tras tener las imágenes procesadas, ya podemos extraer información estadística de ellas. Lo que necesitamos para este estudio, es extraer información de cada capa por separado para cada una de las 915 parcelas en cada una de las 181 fechas de donde disponemos de información. La información que se va a extraer será la media (\bar{X}) y desviación estándar (S), tanto para el ángulo de incidencia (θ_{loc}) como para la retrodispersión en VH (γ_{VH}^0), la retrodispersión en VV (γ_{VV}^0) y el ratio de polarización cruzada VH/VV. Al extraer las estadísticas, obtenemos una matriz de 915 filas, cada una correspondiente a una parcela, y 1454 columnas, correspondientes a la información de cada banda en cada fecha.

A modo de aclaración, podemos decir que para cada parcela en cada fecha, por una parte tenemos los datos del tipo de aprovechamiento que se ha realizado, la especie forestal y la superficie, y por otro lado los 8 datos obtenidos de cada imagen. La extracción de las estadísticas ha sido proporcionada por el grupo de investigación THERRAE, para su obtención se ha utilizado el software libre QGIS gestionado desde una consola Python.

4.4 PROCESADO DE LOS DATOS

Antes de comenzar con la extracción de la información y para comprender mejor los datos que queremos obtener, se detallan las variables principales con las que vamos a trabajar (tabla 5). También se muestra a modo de resumen, una tabla con todos los análisis que se pretenden realizar en este estudio (tabla 6), que posteriormente se explicarán más al detalle. Estos análisis se realizarán en primer lugar a todas las parcelas de la muestra y posteriormente se aplicará un filtro para realizar el mismo estudio exclusivamente a las parcelas superiores a 0.5 ha; para valorar si el tamaño de parcela influye en los resultados obtenidos.

Tabla 5. Datos de partida para la extracción de los resultados

INFORMACIÓN DE PARTIDA PARA CADA VARIABLE	
PARCELAS	915
TIPO DE APROVECHAMIENTO	3
ESPECIES FORESTALES	11
FECHAS	181

Tabla 6. Datos que se pretenden obtener del estudio

ESTUDIO	CLASIFICACIÓN POR CONTENIDO DE LA PARCELA	CLASIFICACIÓN POR APROVECHAMIENTO	FECHAS QUE SE VAN A EMPLEAR	BANDAS EMPLEADAS	FINALIDAD DEL ESTUDIO
I	SIN SEPARAR, USO DE TODAS LAS PARCELAS AGRUPADAS	CLARA, CORTA FINAL Y NO REALIZADO	FECHA INICIAL EN 2014 Y FECHA FINAL EN 2018 PARA ESTUDIO DE RETRODISPERSIÓN; Y FECHAS ANIVERSARIO ADQUIRIDAS EN LOS DISTINTOS MESES DEL AÑO PARA EL ANÁLISIS DE LA SEPARABILIDAD	VH, VV y VH/VV	COMPARAR LAS DIFERENCIAS DE RETRODISPERSIÓN ENTRE LA FECHA INICIAL Y FINAL EN LAS DIFERENTES BANDAS, Y POR OTRA PARTE, ANALIZAR LA SEPARABILIDAD QUE SE PRODUCE EN LOS DIFERENTES MESES E IDENTIFICAR LA BANDA QUE MEJORES RESULTADOS PROPORCIONE
II	PARCELAS AGRUPADAS POR ESPECIE	CLARA, CORTA FINAL Y NO REALIZADO	FECHA INICIAL EN 2014 Y FECHA FINAL EN 2018 PARA ESTUDIO DE RETRODISPERSIÓN; Y FECHAS ANIVERSARIO ADQUIRIDAS EN LOS DISTINTOS MESES DEL AÑO PARA EL ANÁLISIS DE LA SEPARABILIDAD	VH, VV y VH/VV	DETERMINAR EN QUE ESPECIE SE IDENTIFICAN MEJOR LAS VARIACIONES DE RETRODISPERSIÓN Y EVALUAR EN QUE BANDA SE PRODUCE MEJOR SEPARABILIDAD PARA CADA TIPO DE APROVECHAMIENTO EN LOS DIFERENTES MESES
III	ANÁLISIS INDIVIDUAL POR PARCELA	CLARA, CORTA FINAL Y NO REALIZADO	TODAS LAS IMÁGENES ENTRE 2014 Y 2018	SE EMPLEARÁ LA BANDA QUE MEJORES RESULTADOS HAYA PRODUCIDO EN LOS ESTUDIOS I Y II	REALIZACIÓN DE UNA SERIE TEMPORAL COMPLETA POR PARCELA PARA IDENTIFICAR QUE TIPO DE APROVECHAMIENTO FORESTAL SE HA PRODUCIDO

Al tener las estadísticas, el siguiente paso es trabajar con ellas para obtener la información que queremos. Debido a la gran dimensión de la matriz (915 filas x 1454 columnas), se ha decidido agilizar el proceso utilizando programación con Python. Por ello, todo el procesamiento de los datos junto con la representación de las curvas temporales de retrodispersión se ha obtenido mediante este sistema. La creación del código y ejecución del mismo se ha realizado desde el intérprete SPYDER. Para la extracción de la información de la tabla se ha utilizado la librería Pandas, mientras que para la representación de las series temporales se ha empleado la librería matplotlib.

4.4.1 Estudio I. Análisis bitemporal

En el primer caso, vamos a analizar la media de retrodispersión en VH, VV y VH/VV, para ello, se comparará la fecha inicial del 24/10/2014 con la fecha final del 21/10/2018. Se escogen estas fechas de la misma época del año para que existan entre ellas las mínimas diferencias climáticas posibles. Por otro lado, estas fechas son las que mejor se adaptan a las fechas de las ortofotos que se utilizaron para obtener la información de las parcelas de muestra.

Se usarán todas las parcelas conjuntas y se realizará el cálculo para cada tipo de aprovechamiento por separado, como también se calculará la distancia normalizada. De este análisis se pretende conocer si Sentinel-1 es capaz de detectar diferencias de retrodispersión tras realizar los diferentes tipos de aprovechamientos, y en qué polarización se identifican mejor esas diferencias. Este estudio se realizará en primer lugar para todas las parcelas y en segundo lugar se realizará un filtro para emplear solamente las parcelas superiores a 0.5 hectáreas.

Por otro lado, se realizará una representación gráfica comparando imágenes aniversario adquiridas en los distintos meses del año, y se analizará la separabilidad existente en la retrodispersión entre el momento anterior y posterior a la realización del aprovechamiento, donde se mostrarán los resultados para los tres tipos de aprovechamiento en las tres diferentes polarizaciones. Con este análisis se pretende evaluar la separabilidad de cada aprovechamiento en las diferentes bandas, identificar la que mejores resultados ofrezca y determinar cuál es el mejor mes para detectar los cambios.

El procedimiento que se seguirá en Python será el de leer el archivo .CSV con toda la información, indicar las fechas que nos interesa y posteriormente utilizando la librería Pandas se generarán agrupaciones según el tipo de aprovechamiento. A partir de esto se extraerá la información de la tabla y se realizarán los cálculos oportunos que se guardarán en un nuevo archivo .CSV. Mientras que para el estudio de separabilidad, luego de extraer la información ya procesada de Python, se generarán las gráficas con Excel.

4.4.2 Estudio II. Análisis bitemporal por especie

Al igual que en el primer caso, se analizará la media de la retrodispersión en VH, VV y VH/VV para las fechas 24/10/2014 y 21/10/2018, como también se obtendrá el valor de la distancia normalizada. Esto se realizará igualmente para los distintos tipos de aprovechamiento, y en este caso se efectuará una clasificación por especie, con la finalidad de establecer en qué especie se identifican mejor los cambios. Se repetirá el mismo estudio únicamente para las parcelas superiores a 0.5 hectáreas.

En la segunda parte del estudio, se elaborará una representación gráfica por especie de las distancias normalizadas por meses, que nos permita identificar qué especies ofrecen mejores valores de separabilidad a la hora de detectar los diferentes aprovechamientos forestales, y en que polarización y época del año esos valores de separabilidad son mayores.

Para la realización del script de Python, se procederá a leer el archivo .CSV donde tenemos toda la información, indicar las fechas de interés y a partir de la librería Pandas se crearán agrupaciones tanto por el tipo de aprovechamiento como por la especie forestal. La información extraída se guardará en un nuevo archivo .CSV. Como se procedió para el estudio I, las gráficas para analizar la separabilidad se realizarán con Excel.

4.4.3 Estudio III. Análisis multitemporal

Para este estudio se emplearán todas las fechas desde el 24/10/2014 al 21/10/2018, es decir, 163 fechas diferentes. Se utilizará la media de la retrodispersión en VH, VV y VH/VV y se realizará el análisis para las parcelas donde se hayan realizado cortas finales, claras o ningún tipo de aprovechamiento. En este caso, se analizará cada parcela por separado, realizando una gráfica temporal donde se pueda observar el comportamiento en las tres polarizaciones para el periodo completo de 4 años. Posteriormente, utilizando la banda que mejores resultados haya proporcionado para el estudio I y II, se calculará la media de la serie temporal completa. A partir de esta serie temporal y de la media obtenida, se realizará una representación gráfica de la suma acumulada de la distancia de cada valor de la serie temporal con respecto a la media; es decir, cuando el valor de la serie temporal sea superior a la media, se sumará al valor acumulado y la gráfica irá en sentido ascendente, y cuando aparezcan valores inferiores a la media, se sumarán al acumulado con signo negativo, lo que producirá un valor acumulado menor, y por consiguiente, la gráfica irá en sentido descendente. A partir de esta nueva gráfica generada, se calculará la diferencia entre el valor máximo y mínimo acumulado. Esta diferencia entre los valores máximos y mínimos obtenidos para cada parcela se agruparán por la especie y tipo de aprovechamiento al que corresponda, para posteriormente realizar una representación con diagramas de caja que nos permita analizar visualmente si es posible identificar los diferentes aprovechamientos forestales.

En Python se leerá el archivo .CSV con toda la información y se indicarán todas las fechas de interés. Se empleará Pandas para extraer la información de todas las fechas para cada parcela. Esta información extraída será empleada por la librería matplotlib para generar una gráfica de la serie temporal de retrodispersión para cada parcela con las tres bandas, generando un total de 915 gráficas. Posteriormente se obtendrá otra gráfica por parcela con la banda que nos interesa trabajar y con la media de esa banda. Y ya para finalizar se generará la gráfica de las sumas acumuladas para cada parcela, de donde se va a extraer la diferencia entre el valor máximo y mínimo que se agrupará por especie forestal y tipo de aprovechamiento. Estos datos se extraerán a Excel donde se generarán los correspondientes diagramas de caja.

5. RESULTADOS

5.1 ESTUDIO I: ANÁLISIS BITEMPORAL

5.1.1 Retrodispersión y distancias normalizadas en VH

Tabla 7. Retrodispersión en VH para el conjunto de las parcelas

RETRODISPERSIÓN EN VH				
TIPO DE APROVECHAMIENTO	24/10/2014	21/10/2018	VARIACIÓN	DISTANCIA NORMALIZADA
CLARA	-13,96	-14,45	0,49	0,19
CORTA FINAL	-13,66	-15,47	1,80	0,57
NO REALIZADO	-13,54	-14,13	0,58	0,21

Tabla 8. Retrodispersión en VH para el conjunto de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN VH PARA SUPERFICIES MAYORES A 0,5 HECTÁREAS				
TIPO DE APROVECHAMIENTO	24/10/2014	21/10/2018	VARIACIÓN	DISTANCIA NORMALIZADA
CLARA	-13,95	-14,42	0,47	0,18
CORTA FINAL	-13,61	-15,53	1,92	0,57
NO REALIZADO	-13,46	-14,07	0,60	0,22

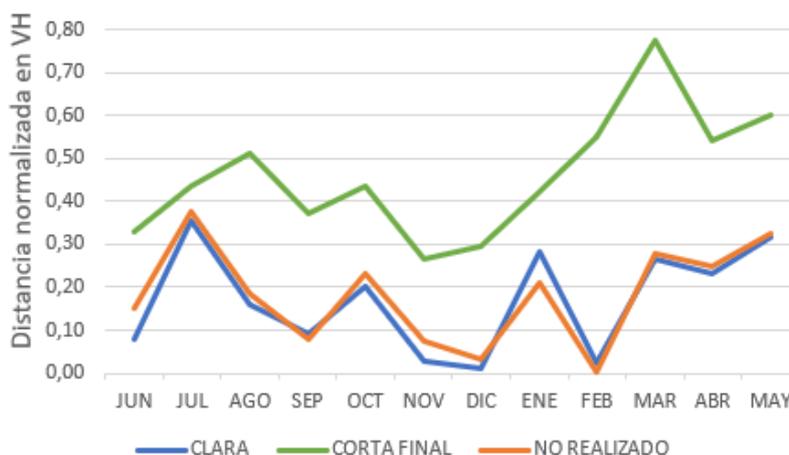


Figura 6. Distancia normalizada por meses para un periodo de un año en VH

Al analizar la retrodispersión en VH de la fecha inicial con la final se puede observar que las parcelas donde se aprecia mayor diferencia son en donde se ha realizado una corta final. En estos casos se observa como la retrodispersión se reduce en casi 2 dB (tabla 6). Una de las causas es debida a que al realizar el tratamiento de corta final, desaparece la retrodispersión de volumen producida por las copas de los árboles y se produce retrodispersión superficial, la cual es sustancialmente menor en esta polarización.

Las parcelas donde se ha realizado un tratamiento de clara o en las que no se ha realizado ningún tipo de tratamiento la variación en mucho menor, teniendo unos valores similares entre ellas. En ambos casos se observa como se produce una reducción de la retrodispersión aproximada de 0,5 dB (tabla 6). Estos resultados tan similares entre sí pueden ser debidos a que al realizar una clara, los árboles restantes que quedan en pie, tienen menos competencia entre ellos, y en un periodo relativamente corto de tiempo, ensanchan sus copas ocupando nuevamente toda la superficie aérea producida por la clara. En este análisis como se compara un periodo de tiempo de 4 años, se entiende que es tiempo más que suficiente para que una masa forestal pueda obtener el mismo índice de área foliar existente antes de la clara.

El análisis realizado para el total de todas las parcelas en comparación con el análisis para las parcelas superiores a 0,5 hectáreas nos da resultados muy similares (tablas 6 y 7), siguiendo la misma tendencia y sin ningún valor significativo que se considere necesario mencionar. Por lo tanto, no parece que el tamaño de parcela sea un aspecto trascendental en la capacidad de detección de aprovechamientos con estas imágenes.

En la figura 6, se presentan las distancias normalizadas por meses para un periodo de un año iniciado en junio, la decisión de iniciar este análisis en junio es debido a que de este modo se aprovecha en mayor medida los datos iniciales de los que disponemos. Podemos visualizar que durante todo el periodo, las parcelas de corta final mantienen unas diferencias de separabilidad más altas. Esta mayor diferencia nos proporciona mayor facilidad para identificar si se ha producido un cambio. En marzo se aprecia un pico donde la separabilidad es mayor al resto de meses, alcanzando resultados cercanos a 0,8. Por ello, en este caso podemos decir que el mejor momento para identificar una corta final sería ese mes. Por otro lado, las parcelas donde se ha realizado una clara o donde no se ha realizado ningún tipo de tratamiento siguen una tendencia semejante durante todo el año, con valores mucho más bajos que en ciertos momentos se aproximan a cero, debido a esto, resultaría muy difícil predecir si se ha realizado una clara.

5.1.1 Retrodispersión y distancias normalizadas en VV

Tabla 9. Retrodispersión en VV para el conjunto de las parcelas

RETRODISPERSIÓN EN VV				
TIPO DE APROVECHAMIENTO	24/10/2014	21/10/2018	VARIACIÓN	DISTANCIA NORMALIZADA
CLARA	-8,59	-8,96	0,37	0,14
CORTA FINAL	-8,14	-9,39	1,25	0,40
NO REALIZADO	-8,04	-8,72	0,68	0,24

Tabla 10. Retrodispersión en VV para el conjunto de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN VV PARA SUPERFICIES MAYORES A 0,5 HECTÁREAS				
TIPO DE APROVECHAMIENTO	24/10/2014	21/10/2018	VARIACIÓN	DISTANCIA NORMALIZADA
CLARA	-8,57	-8,99	0,42	0,16
CORTA FINAL	-8,19	-9,44	1,25	0,37
NO REALIZADO	-8,05	-8,73	0,68	0,24

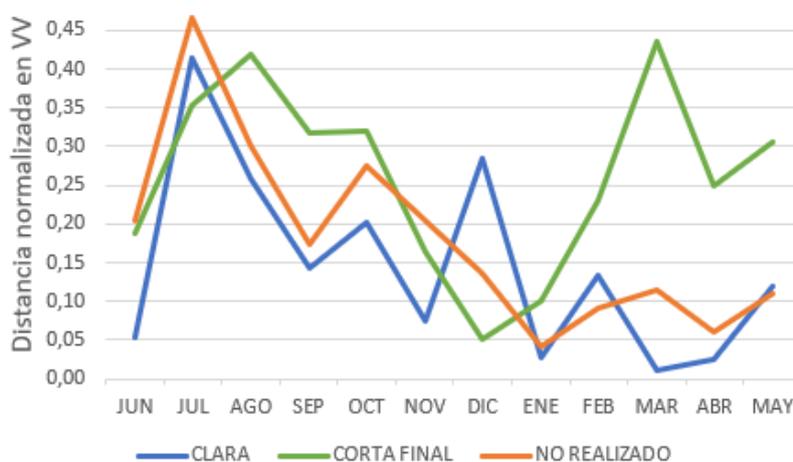


Figura 7. Distancia normalizada por meses para un periodo de un año en VV

Al examinar los valores de retrodispersión en VV podemos ver que siguen la misma tendencia que en VH pero con valores de variaciones de la media de retrodispersión inferiores para claras y cortas finales. Para las parcelas donde no se ha realizado ningún tratamiento se observa un leve ascenso (tabla 9). La reducción de la diferencia de retrodispersión en la polarización VV se debe a que este tipo de polarización es más sensible a la retrodispersión superficial y de doble rebote, y no a la retrodispersión de volumen como sucede en este caso.

Las cortas finales siguen teniendo una mayor diferencia de retrodispersión, con una variación superior a 1 dB. Para las claras y parcelas sin ningún tratamiento el valor sigue siendo bajo (tabla 9), lo cual es normal para las parcelas sin tratamiento, pero en el caso de las parcelas con trabajos de clara, este dato tan bajo nos impide identificar si realmente se ha producido un cambio. Como en el caso anterior, las diferencias entre los valores del análisis de todas las parcelas en comparación con el análisis de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas son insignificantes (tablas 9 y 10).

Al observar la distancia normalizada por meses (figura 7), vemos que los tres aprovechamientos siguen una tendencia muy heterogénea, con picos altos y bajos. En la mayor parte de la línea temporal, los valores de la distancia son inferiores en comparación con las distancias normalizadas en VH, esto nos indica que es más compleja la identificación de cambios en VV en relación a VH. El mes de marzo sigue siendo el mejor a la hora de identificar si se ha realizado una corta final.

5.1.1 Retrodispersión y distancias normalizadas en VH/VV

Tabla 11. Retrodispersión en el ratio VH/VV para el conjunto de las parcelas

RETRODISPERSIÓN EN VH/VV				
TIPO DE APROVECHAMIENTO	24/10/2014	21/10/2018	VARIACIÓN	DISTANCIA NORMALIZADA
CLARA	-5,37	-5,49	0,12	0,04
CORTA FINAL	-5,53	-6,07	0,54	0,18
NO REALIZADO	-5,51	-5,40	-0,10	0,03

Tabla 12. Retrodispersión en el ratio VH/VV para el conjunto de las parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN VH/VV PARA SUPERFICIES MAYORES A 0,5 HECTÁREAS				
TIPO DE APROVECHAMIENTO	24/10/2014	21/10/2018	VARIACIÓN	DISTANCIA NORMALIZADA
CLARA	-5,38	-5,43	0,05	0,02
CORTA FINAL	-5,42	-6,09	0,67	0,21
NO REALIZADO	-5,42	-5,34	-0,08	0,02

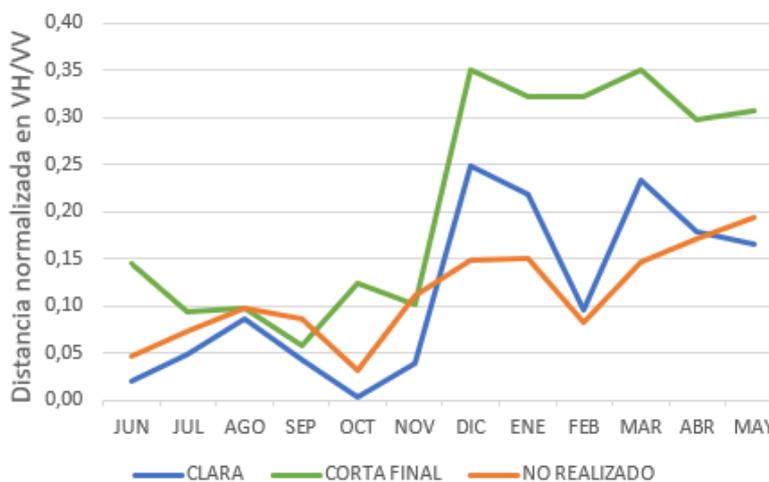


Figura 8. Distancia normalizada por meses para un periodo de un año en el ratio VH/VV

En la tabla 11 y 12 se puede apreciar que para el ratio VH/VV las cortas finales siguen teniendo mayor variación de retrodispersión entre las dos fechas, aunque en esta ocasión, esa variación es mucho más baja que en los casos mostrados anteriormente para VH y VV. En el caso de las claras el valor está muy cercano a cero, y llegando a ser negativo para las parcelas donde no se ha realizado ningún tratamiento. El ratio de polarización cruzada VH/VV está relacionado directamente con las diferencias entre la retrodispersión en VH y VV. En este caso, como hemos observado anteriormente, la retrodispersión en VH como en VV, pese a que difieren en sus valores, siguen la misma tendencia, reduciendo el valor de retrodispersión de la primera fecha a la última. Debido a esto se entiende la obtención de estos valores más bajos para el ratio.

Al analizar la distancia normalizada por meses (figura 8), se observa que los resultados también son más bajos (véase la menor variación en el eje Y en comparación con las figuras 6 y 7), predominando los valores más altos para las cortas finales, sin llegar en cualquier caso a valores superiores a 0,35. Las claras y las parcelas sin tratamiento siguen una trayectoria similar con resultados más bajos que impiden identificar un posible cambio en el caso de las claras.

5.2 ESTUDIO II: ANÁLISIS BITEMPORAL POR ESPECIE

5.2.1 Retrodispersión y distancias normalizadas en Pino Alepo

Tabla 13. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Alepo

RETRODISPERSIÓN EN PINO ALEPO						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	1,20	0,45	0,53	0,19	0,68	0,20
SIN APROVECHAMIENTO	1,67	0,70	0,69	0,26	0,98	0,31

Tabla 14. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Alepo para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN PINO ALEPO PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	1,30	0,49	0,49	0,17	0,82	0,23
SIN APROVECHAMIENTO	1,51	0,62	1,02	0,40	0,50	0,16

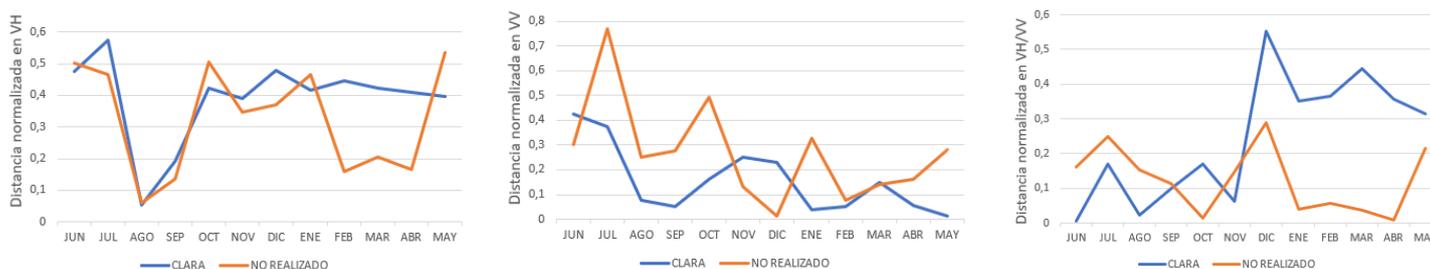


Figura 9. Distancia normalizada por meses para Pino Alepo

Vemos que para el Pino Alepo tenemos muestras para aprovechamientos de clara y parcelas sin aprovechamientos. En ambos casos podemos apreciar que en la polarización VH es donde hay mayor variación de retrodispersión, con valores similares superiores a 1 dB (tablas 13 y 14). Estos valores tan semejantes nos impiden realizar una distinción entre las dos clases para poder identificar la realización de las claras. Lo mismo sucede cuando se analiza la distancia normalizada por meses (figura 9), en gran parecido entre ambas clases es un inconveniente para identificar si en una muestra se ha realizado clara o no.

5.2.2 Retrodispersión y distancias normalizadas en Alerce

Tabla 15. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Alerce

RETRODISPERSIÓN EN ALERCE						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	3,38	0,95	2,73	0,87	0,65	0,22
CLARA	1,08	0,41	1,40	0,48	-0,32	0,11
SIN APROVECHAMIENTO	0,79	0,30	0,78	0,31	0,02	0,01

Tabla 16. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Alerce para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN ALERCE PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	3,66	0,90	2,88	0,79	0,78	0,23
CLARA	1,08	0,41	1,40	0,48	-0,32	0,11
SIN APROVECHAMIENTO	1,35	0,47	1,04	0,35	0,31	0,10

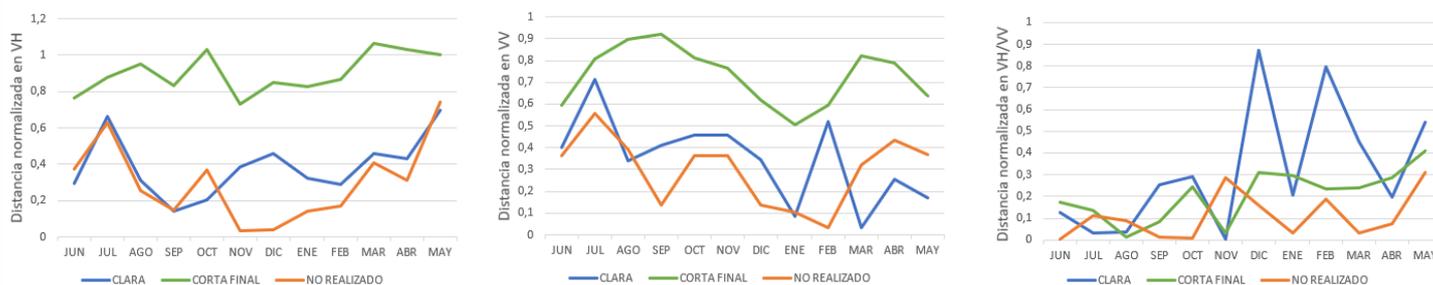


Figura 10. Distancia normalizada por meses para Alerce

Al analizar las diferencias de retrodispersión en las parcelas de Alerce vemos una clara variación de más de 3 dB para las muestras de corta final en VH, este valor es claramente superior al de las clases clara o no realizado (tablas 15 y 16). Al igual que sucede en los otros casos, la variación en VH es la que muestra cambios más significativos, disminuyendo este valor para VV y siendo aún menor para el ratio VH/VV.

Al comparar la distancia normalizada por meses (figura 10), observamos que los valores más altos los encontramos en VH para las parcelas de corta final, mostrando una tendencia bastante homogénea durante todo el periodo, con un pico máximo superior a 1 para el mes de marzo. Las otras clases siguen una tendencia muy similar entre sí, por lo que parece difícil detectar cambios en las parcelas donde se han realizado claras.

5.2.3 Retrodispersión y distancias normalizadas en Chopo

Tabla 17. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Chopo

RETRODISPERSIÓN EN CHOPO						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	2,50	0,78	1,24	0,41	1,27	0,38
SIN APROVECHAMIENTO	1,02	0,37	1,25	0,47	-0,23	0,07

Tabla 18. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Chopo para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN CHOPO PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	2,64	0,78	1,21	0,38	1,43	0,42
SIN APROVECHAMIENTO	1,01	0,37	1,15	0,43	-0,14	0,04



Figura 11. Distancia normalizada por meses para Chopo

Las muestras de Chopo de las que disponemos información son para cortas finales y parcelas sin ningún tipo de aprovechamiento, ya que en esta especie forestal no se utilizan tratamientos de claras. Las mayores variaciones corresponden a la retrodispersión en VH para las cortas finales, con valores superiores a los 2 dB. Para las parcelas sin ningún tratamiento las variaciones son próximas a 1 dB. También se puede apreciar que las muestras sin tratamiento sufren un ligero ascenso de variación en VV en comparación con VH (tablas 17 y 18).

Las distancias normalizadas por meses, muestran también mejores resultados de separabilidad en la retrodispersión en VH para las parcelas donde se ha realizado conta final, obteniendo valores superiores a 1 en los meses de enero, febrero y marzo (figura 11). Para VV y el ratio VH/VV estos valores son inferiores, lo cual tiene un menor interés a la hora de estudiar la separabilidad.

5.2.4 Retrodispersión y distancias normalizadas en Encina

Tabla 19. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Encina

RETRODISPERSIÓN EN ENCINA						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	0,96	0,39	0,52	0,21	0,44	0,15
SIN APROVECHAMIENTO	1,45	0,54	1,04	0,41	0,40	0,12

Tabla 20. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Encina para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN ENCINA PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	0,92	0,40	0,34	0,14	0,58	0,20
SIN APROVECHAMIENTO	1,46	0,54	1,05	0,42	0,41	0,12



Figura 12. Distancia normalizada por meses para Encina

Los resultados de las variaciones de retrodispersión para la Encina, muestran unos cambios superiores en las parcelas sin aprovechamiento en comparación con las claras, sin ser estos muy significativos (tabla 19 y 20). VH sigue siendo la polarización donde mejor se aprecian dichos cambios para ambas muestras. En el análisis de las distancias normalizadas por meses (figura 12), podemos observar que igual que en casos anteriores (figuras 9 y 10), las dos muestras siguen la misma tendencia durante todo el periodo. Por tanto, parece difícil poder identificar este tipo de aprovechamientos con la metodología aplicada.

5.2.5 Retrodispersión y distancias normalizadas en Haya

Tabla 21. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Haya

RETRODISPERSIÓN EN HAYA						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	0,54	0,23	0,50	0,22	0,03	0,01
SIN APROVECHAMIENTO	0,02	0,01	0,89	0,32	-0,87	0,27

Tabla 22. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Haya para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN HAYA PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	0,42	0,18	0,69	0,33	-0,27	0,09
SIN APROVECHAMIENTO	0,00	0,00	0,84	0,30	-0,85	0,26

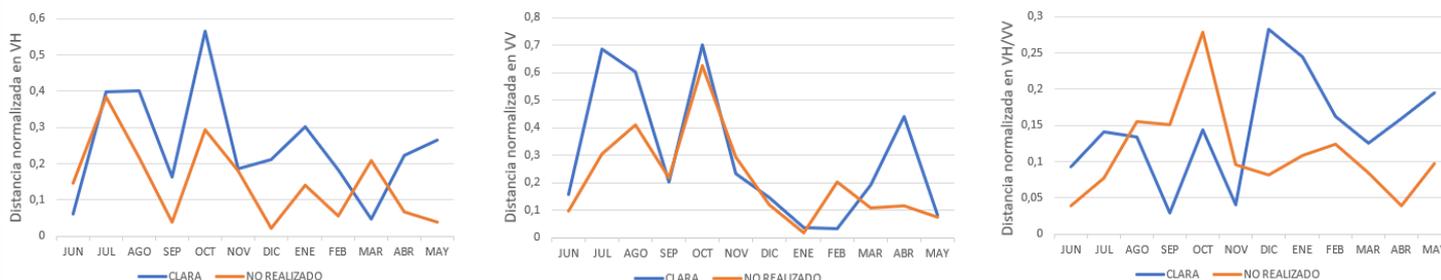


Figura 13. Distancia normalizada por meses para Haya

Los valores obtenidos para la diferencia de retrodispersión en el Haya tanto para clara como para parcelas sin aprovechamiento son relativamente bajos (tablas 21 y 22). Si nos fijamos en las parcelas sin aprovechamiento en VH la variación es prácticamente 0, esta es la situación ideal ya que significaría que para ambas fechas la retrodispersión no varía, que es lo que se espera. Sin embargo, en VV esa retrodispersión se muestra mayor, al igual que ocurría en el caso del Chopo (tablas 17 y 18).

Al estudiar la distancia normalizada por meses, en este caso, vemos que VV muestran valores un poco más altos de separabilidad que VH, siguiendo una tendencia poco lineal con mucha variación entre meses (figura 13). Al comparar el comportamiento de ambas muestras vemos que siguen una trayectoria similar, obteniendo valores en general ligeramente más altos para las claras; aun así, seguiría existiendo una gran dificultad para la identificación de la realización de este aprovechamiento.

5.2.6 Retrodispersión y distancias normalizadas en Pino Laricio

Tabla 23. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Laricio

RETRODISPERSIÓN EN PINO LARICIO						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	2,46	0,80	1,93	0,64	0,52	0,18
CLARA	0,21	0,08	0,10	0,03	0,12	0,04
SIN APROVECHAMIENTO	0,37	0,13	0,66	0,23	-0,28	0,09

Tabla 24. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Laricio para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN PINO LARICIO PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	3,16	0,97	1,90	0,54	1,26	0,38
CLARA	0,28	0,10	0,13	0,05	0,15	0,05
SIN APROVECHAMIENTO	0,60	0,20	0,64	0,23	-0,03	0,01

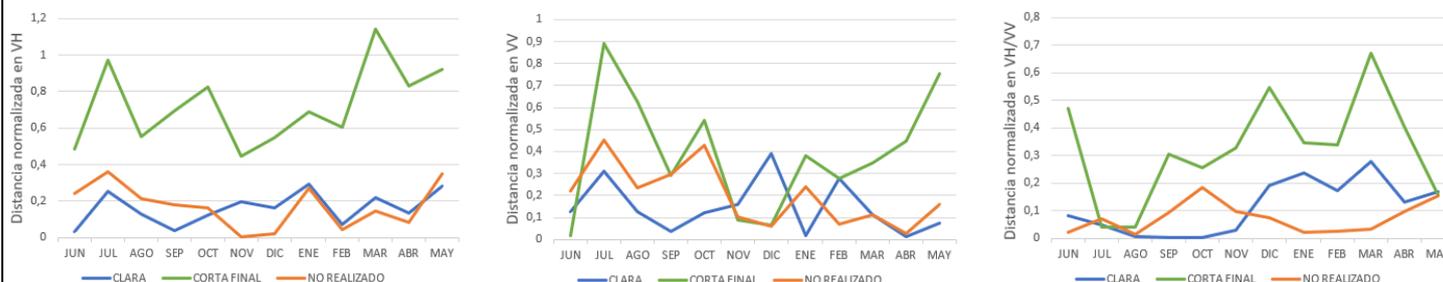


Figura 14. Distancia normalizada por meses para Pino Laricio

Los resultados obtenidos para el Pino Laricio son otro claro ejemplo donde se aprecia que la variación en retrodispersión VH para la corta final es donde mayor diferencia se alcanza, superando los 2 dB (tablas 23 y 24). Esta diferencia disminuye tanto para VV como para el ratio VH/VV. Al fijarnos en los valores para las muestras de clara y las muestras sin tratamientos, las variaciones que se obtienen son muy bajas, inferiores a 1 dB.

Al examinar las distancias normalizadas por meses, se puede visualizar sin ninguna duda que para VH los resultados de separabilidad son mejores, destacando con valores mucho más altos que en las otras muestras las parcelas donde se han realizado cortas finales, obteniendo un pico máximo en el mes de marzo (figura 14).

5.2.7 Retrodispersión y distancias normalizadas en otras coníferas

Tabla 25. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras coníferas

RETRODISPERSIÓN EN OTRAS CONÍFERAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	1,62	0,50	1,67	0,54	-0,05	0,02
CLARA	0,76	0,22	0,84	0,26	-0,08	0,03
SIN APROVECHAMIENTO	-0,39	0,17	0,81	0,30	-1,20	0,61

Tabla 26. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras coníferas para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN OTRAS CONÍFERAS PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	0,65	0,22	1,34	0,39	-0,69	0,19
CLARA	0,76	0,22	0,84	0,26	-0,08	0,03
SIN APROVECHAMIENTO	-0,20	0,10	0,79	0,27	-0,99	0,32

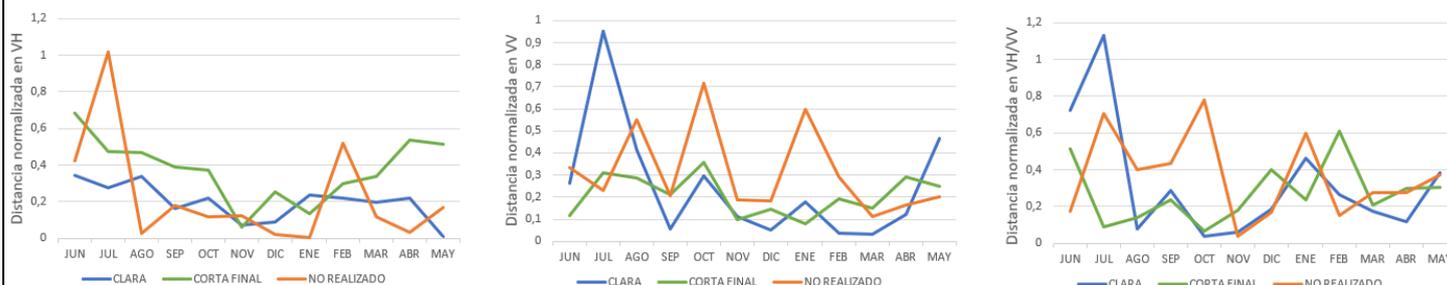


Figura 15. Distancia normalizada por meses para Otras coníferas

Los valores obtenidos en las variaciones de retrodispersión para otras coníferas muestran las mayores diferencias para VH y VV en las parcelas donde se han realizado cortas finales, con valores muy similares entre ellas (tabla 25). Por otro lado, al visualizar las gráficas donde se muestran las distancias normalizadas por meses, las tres muestras presentan un comportamiento irregular, con picos puntuales que impiden extraer conclusiones claras de la separabilidad existente (figura 15).

Hay que mencionar que para el grupo de otras coníferas es para el que se dispone de menor número de datos, con tan solo 9 muestras para las tres posibles variables (tabla 2), por ello, aunque se haya realizado el estudio para este grupo por separado, los resultados obtenidos no se van a valorar del mismo modo que para las otras especies forestales, ya que no se considera un número suficiente de muestras como para obtener resultados consistentes.

5.2.8 Retrodispersión y distancias normalizadas en otras frondosas

Tabla 27. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras frondosas

RETRODISPERSIÓN EN OTRAS FRONDOSAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	2,68	1,17	1,63	0,80	1,05	0,59
CLARA	0,16	0,06	0,58	0,23	-0,42	0,12
SIN APROVECHAMIENTO	0,89	0,32	0,60	0,21	0,30	0,09

Tabla 28. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en otras frondosas para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN OTRAS FRONDOSAS PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CLARA	0,45	0,16	0,57	0,24	-0,12	0,03
SIN APROVECHAMIENTO	0,83	0,30	0,70	0,24	0,13	0,04

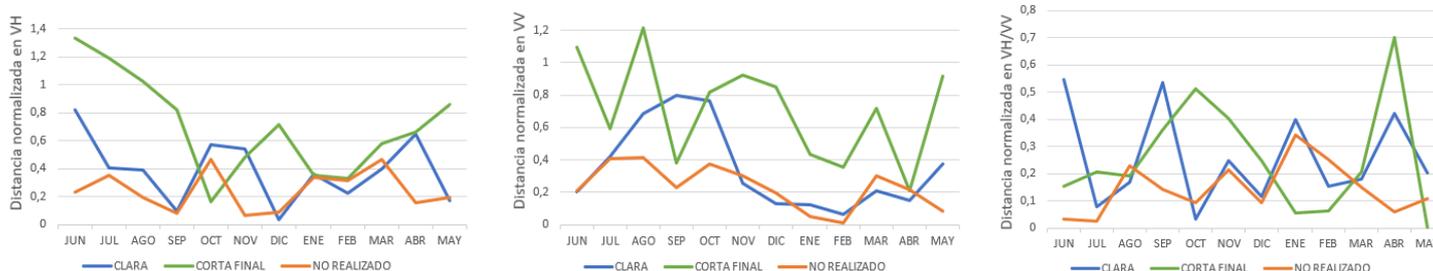


Figura 16. Distancia normalizada por meses para Otras Frondosas

Podemos observar que para otras frondosas se muestra una buena variación de la retrodispersión entre las dos fechas en aprovechamientos de corta final en VH, con valores superiores a 2 dB, disminuyendo para VV y siendo aún menores para el ratio VH/VV (tablas 27 y 28). Tanto para claras como para parcelas sin aprovechamientos los valores no son muy significativos, siendo inferiores a 1 dB en todos los casos.

Los gráficos de las distancias normalizadas muestran valores de separabilidad altos tanto en VH como en VV, con variaciones relativamente altas entre los diferentes meses (figura 16). En las parcelas de corta final es donde se aprecia una mejor separabilidad. Para el ratio VH/VV los valores ya son menores.

5.2.1 Retrodispersión y distancias normalizadas en Pino Radiata

Tabla 29. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Radiata

RETRODISPERSIÓN EN PINO RADIATA						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	1,11	0,35	0,66	0,20	0,45	0,15
CLARA	0,43	0,15	-0,11	-0,04	0,54	0,18
SIN APROVECHAMIENTO	0,22	0,07	0,16	0,05	0,06	0,02

Tabla 30. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Radiata para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN PINO RADIATA PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	1,27	0,38	0,63	0,18	0,64	0,20
CLARA	0,41	0,14	0,04	0,01	0,38	0,12
SIN APROVECHAMIENTO	0,18	0,06	0,20	0,06	-0,01	0,00

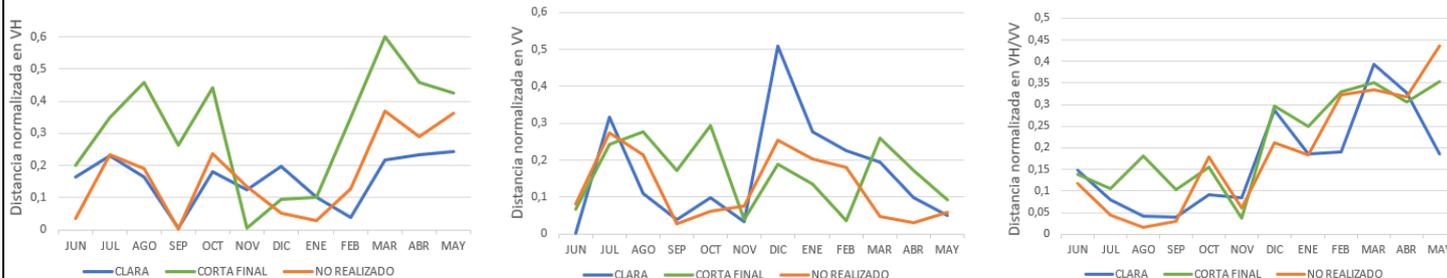


Figura 17. Distancia normalizada por meses para Pino Radiata

Al analizar los resultados obtenidos para las parcelas de Pino Radiata, podemos ver que el valor más alto en la variación de la retrodispersión corresponde a la retrodispersión en VH para cortas finales, con una diferencia algo superior a 1 dB (tablas 29 y 30). Al comparar estas diferencias con las variaciones obtenidas en otras especies o en los resultados generales, vemos que en este caso son mucho más pequeñas. Para las claras y las parcelas sin tratamiento los valores son menores a 0,5 dB.

En el análisis de las distancias normalizadas por meses (figura 17), se obtienen unos resultados más bajos de separabilidad en relación con las otras especies estudiadas. Los mejores resultados se logran en VH en las parcelas de corta final, con un máximo en el mes de marzo (aunque con un valor de 0,6 mucho menor que en otras especies). Las claras y parcelas sin aprovechamiento, en general siguen la misma tendencia durante todo el periodo con valores bajos.

Se debe aclarar que desde hace varios años, la gran mayoría de las repoblaciones de Pino Radiata en Navarra están afectadas por enfermedades producidas por diferentes hongos como son el Chancro resinoso (*Fusarium circinatum*), la banda roja (*Mycosphaerella pini*) y la banda marrón (*Mycosphaerella dearnessii*). Tanto la banda roja como la banda marrón provocan la caída de las hojas o acículas del pino en un periodo realmente corto de tiempo. Podemos decir que en la mayoría de los casos, en la fecha inicial del muestreo, las parcelas ya estaban afectadas por dichas plagas y ya habían sufrido pérdida de parte de su volumen de copas. A causa de esto, la cantidad de luz solar que penetra hasta llegar a la superficie del terreno es mayor, lo que da lugar a un incremento en el desarrollo del sotobosque, volviéndose este mucho más denso. Debido a estos motivos, se puede entender que para esta especie se obtengan valores menores en la variación de retrodispersión, como también unos resultados de separabilidad más bajos.

5.2.2 Retrodispersión y distancias normalizadas en Roble Americano

Tabla 31. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Roble Americano

RETRODISPERSIÓN EN ROBLE AMERICANO						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	1,85	0,54	1,60	0,43	0,25	0,08
CLARA	0,68	0,25	0,41	0,15	0,27	0,09
SIN APROVECHAMIENTO	0,73	0,24	0,87	0,27	-0,14	0,05

Tabla 32. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Roble Americano para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN ROBLE AMERICANO PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	1,47	0,40	1,40	0,36	0,06	0,02
CLARA	0,43	0,16	0,26	0,10	0,16	0,05
SIN APROVECHAMIENTO	0,75	0,24	0,78	0,24	-0,03	0,01



Figura 18. Distancia normalizada por meses para Roble Americano

Al examinar los datos obtenidos para el Roble Americano podemos observar que siguen la misma tendencia general que para el resto de los grupos analizados, con una mayor variación de retrodispersión en VH para las parcelas donde se han realizado cortas finales. Del mismo modo, las claras y parcelas sin tratamiento tienen valores similares entre ellas, inferiores a 1dB (tablas 31 y 32).

Al estudiar la separabilidad a partir de la distancia normalizada por meses (figura 18), obtenemos unos resultados realmente altos para las cortas finales en VH en los meses de febrero, marzo y abril. Las parcelas de clara y sin aprovechamiento, como sucede en la mayoría de los casos, tienen unos valores muy bajos en la mayor parte del periodo, lo que impide la obtención de una buena separabilidad para la detección de claras.

5.2.3 Retrodispersión y distancias normalizadas en Pino Silvestre

Tabla 33. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Silvestre

RETRODISPERSIÓN EN PINO SILVESTRE						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	2,52	0,86	2,39	0,90	0,13	0,04
CLARA	0,52	0,23	0,85	0,35	-0,33	-0,11
SIN APROVECHAMIENTO	0,46	0,18	0,72	0,27	-0,26	-0,08

Tabla 34. Variación de retrodispersión entre el 24/10/2014 y 21/10/2018 en Pino Silvestre para parcelas superiores a 0,5 hectáreas

RETRODISPERSIÓN EN SILVESTRE PARA PARCELAS SUPERIORES A 0,5 HECTÁREAS						
TIPO APROVECHAMIENTO	VARIACIÓN EN VH	DISTANCIA NORMALIZADA VH	VARIACIÓN EN VV	DISTANCIA NORMALIZADA VV	VARIACIÓN EN VH/VV	DISTANCIA NORMALIZADA VH/VV
CORTA FINAL	2,63	0,86	2,52	0,92	0,10	0,03
CLARA	0,41	0,18	0,96	0,39	-0,55	-0,18
SIN APROVECHAMIENTO	0,44	0,17	0,67	0,25	-0,23	-0,07

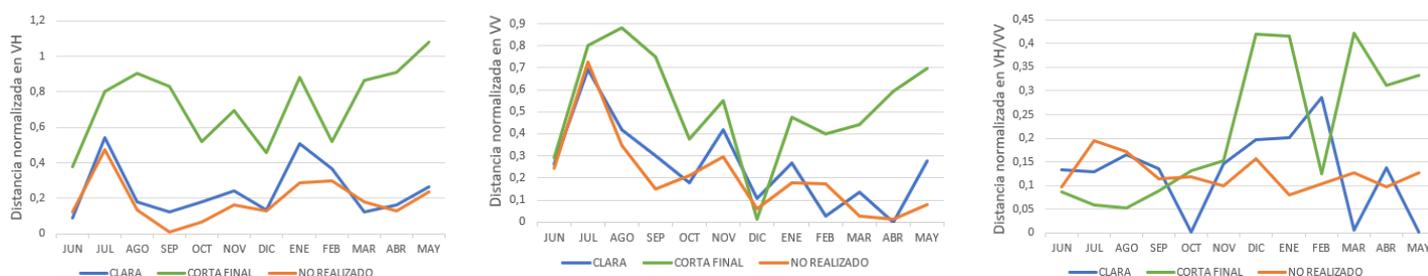


Figura 19. Distancia normalizada por meses para Pino Silvestre

Los resultados obtenidos para el Pino Silvestre se asemejan mucho a lo visto hasta el momento en el resto de las especies, como se ha evidenciado, en la retrodispersión en VH para la corta final es donde siempre se obtienen los valores más altos de variación entre la fecha inicial y la fecha final, siendo en este caso superior a 2 dB (tablas 33 y 34). Las claras y parcelas sin aprovechamiento mantienen valores similares siempre inferiores a 1 dB.

En los gráficos de las distancias normalizadas por meses (figura 19), se puede apreciar claramente que en VH los resultados de separabilidad para las parcelas con tratamientos de corta final son los mejores, como ha ocurrido en la mayor parte de los casos estudiados. También, como ha sucedido en los otros casos, las claras y las parcelas sin tratamiento siguen una continuidad muy paralela entre ellas con valores de separabilidad bajos.

5.3 ESTUDIO III. ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Para este tercer estudio se realizará la representación gráfica de la serie temporal por parcela para las tres polarizaciones estudiadas. Posteriormente se analizará la polarización que mejores resultados haya ofrecido en los estudios I y II realizados anteriormente, que en este caso se evidencia que es la polarización en VH. De los valores de retrodispersión en VH se calculará su media, como también una gráfica suavizada a partir del uso de medias móviles. A continuación se realizará una gráfica de la suma acumulada de los valores de retrodispersión en cada fecha con relación a la media, y ya para finalizar obtendremos la diferencia de extremos para cada parcela que se agruparán según a la especie forestal a la que pertenezca y tipo de aprovechamiento que se le haya realizado, para seguidamente representar los correspondientes diagramas de caja y analizar los resultados obtenidos. Como se van a realizar 4 gráficas por parcela y disponemos de 915 parcelas, solo se mostrarán varias de ellas a modo de ejemplo para conocer el comportamiento de la retrodispersión en la serie temporal y entender mejor el proceso que se ha llevado a cabo.

5.3.1 Representación de las gráficas de la serie temporal para las diferentes parcelas

En este apartado se mostrarán ejemplos de diversas gráficas temporales para diferentes especies y aprovechamientos forestales.

Serie temporal en Pino Silvestre para una parcela sin realización de aprovechamiento

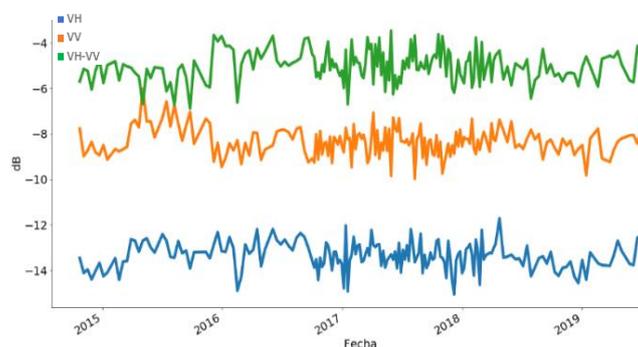


Figura 20. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Pino Silvestre sin realización de aprovechamiento

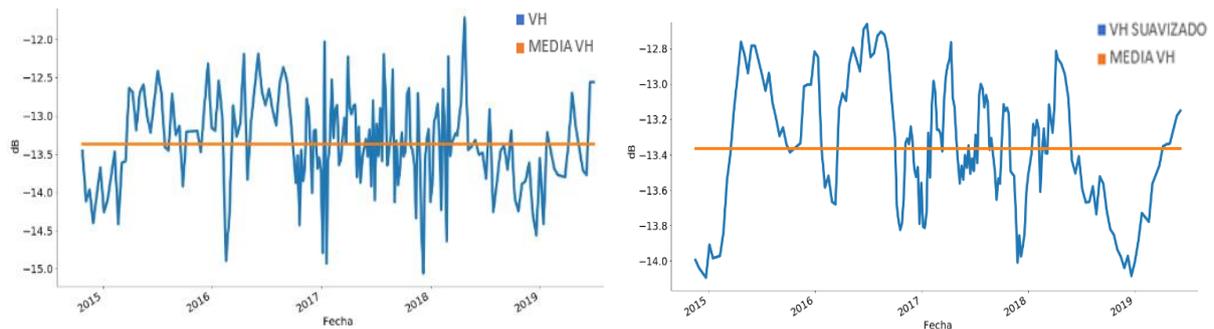


Figura 21. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Silvestre sin aprovechamiento (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

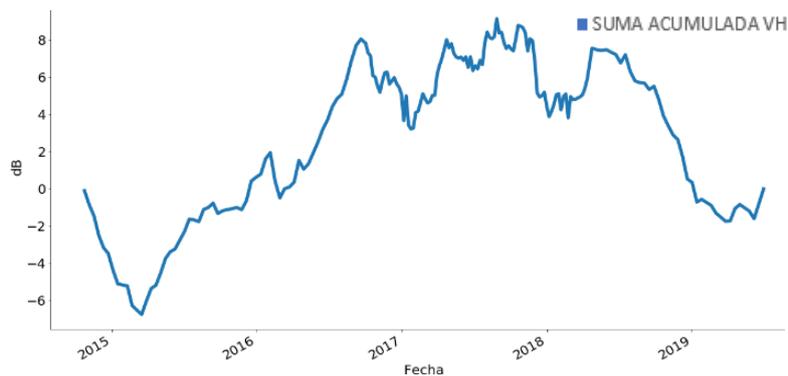


Figura 22. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Silvestre sin aprovechamiento

En esta serie temporal se puede observar que la retrodispersión en las tres bandas sigue una tendencia similar a lo largo de todo el periodo, con muchos picos durante toda la etapa que hacen que su valor varíe constantemente (figura 21 izda). Cuando se suavizan los valores se puede apreciar de forma más clara su progresión (figura 21 dcha). Al visualizar la gráfica de la suma acumulada (figura 22), vemos que al inicio tiene un perfil ascendente y para el último año comienza a descender. A simple vista puede parecer que han sucedido cambios, pero al fijarnos en el rango de dB que ha variado entre su pico máximo y mínimo, vemos que son aproximadamente 15 dB, lo cual es un dato muy bajo en comparación con las parcelas donde se han realizado aprovechamientos, como veremos en los siguientes ejemplos.

Serie temporal en Pino Silvestre para una parcela con aprovechamiento de corta final

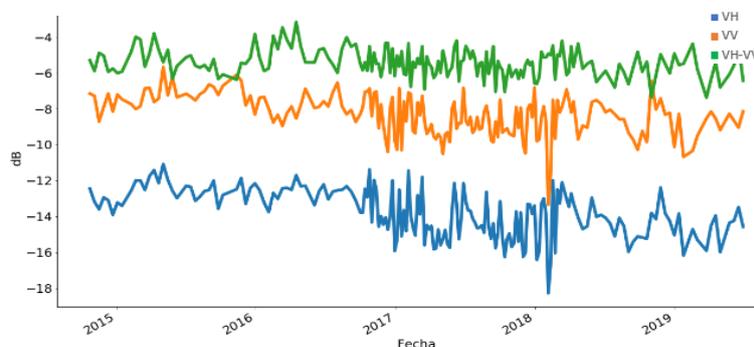


Figura 23. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Pino Silvestre con aprovechamiento de corta final

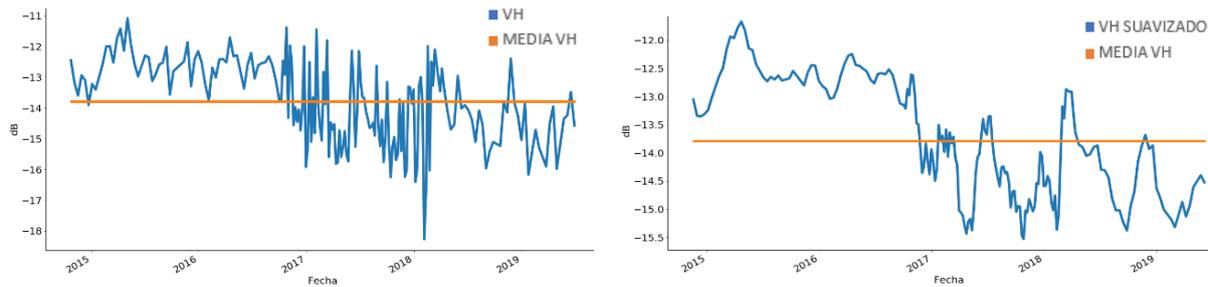


Figura 24. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Silvestre con aprovechamiento de corta final (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

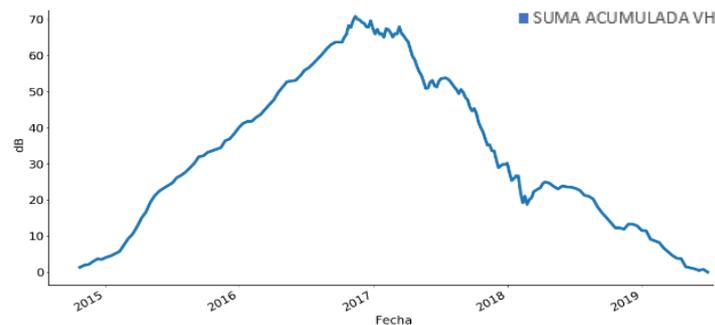


Figura 25. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Silvestre con aprovechamiento de corta final

En este caso tenemos otro ejemplo en Pino Silvestre donde esta vez se ha realizado una corta final. Al fijarnos en la gráfica de la retrodispersión en VH, resulta muy complicado apreciar a simple vista que se haya realizado algún tipo de tratamiento debido a la gran cantidad de oscilaciones que tiene la retrodispersión durante toda la serie (figura 24 izda). Sin embargo, al aplicarle el suavizado, se puede intuir más fácilmente que a inicios de 2017 se produjo algún tipo de cambio en la parcela, ya que se observa que el valor de la retrodispersión disminuye (figura 24 dcha). Para confirmar si en verdad se ha producido algún cambio, se puede contemplar el comportamiento que sigue esta parcela en la suma acumulada de su retrodispersión sobre la media (figura 25), donde se mantiene los primeros años con una evolución ascendente, hasta que llega a un pico y comienza a descender gradualmente. En este caso, se puede ver que la variación entre sus extremos llega a 70 dB, una cifra mucho mayor que en el caso observado anteriormente para una parcela sin aprovechamiento (figura 22).

Serie temporal en Roble Americano para una parcela sin realización de aprovechamiento

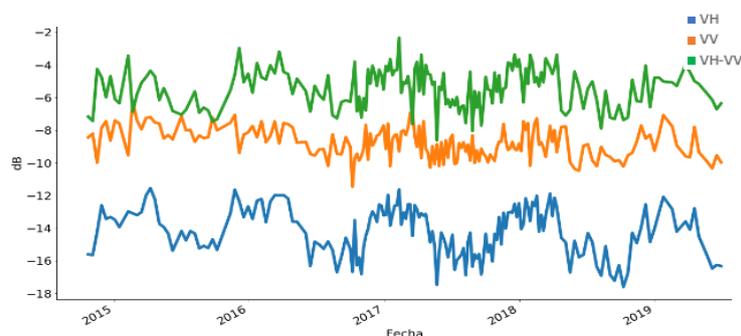


Figura 26. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Roble Americano sin realización de aprovechamiento

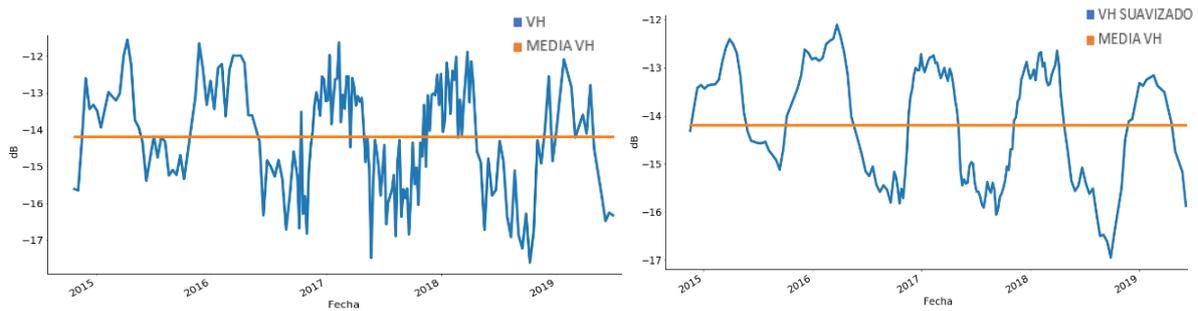


Figura 27. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Roble Americano sin realización de aprovechamiento (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

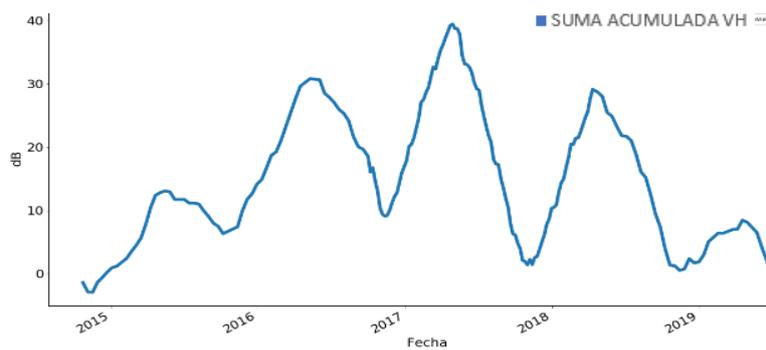


Figura 28. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Roble Americano sin aprovechamiento

Al examinar la serie temporal de la retrodispersión en las tres polarizaciones para esta parcela de Roble Americano, podemos percibir que en VH se producen mayores variaciones (figura 26). Se observa en esta polarización un ciclo repetitivo por años donde en verano la retrodispersión comienza a descender y en los meses finales de cada año esta retrodispersión cambia de tendencia y empieza a aumentar gradualmente su valor (figura 27 izda); en la serie temporal suavizada se puede observar claramente este ciclo (figura 27 dcha). Que suceda este fenómeno, se debe a que el Roble Americano es un árbol caducifolio y en invierno pierde todas sus hojas. Una de las hipótesis que se podría considerar para explicar el aumento de la retrodispersión es que, tras la pérdida de las hojas, los pulsos radar impacten con las ramas más finas de los árboles, y ello genere un incremento del valor del pulso reflejado. Al analizar la gráfica de la suma acumulada (figura 28), vemos que también se reflejan estos ciclos que se producen, creando a causa de ellos, una variación entre los extremos aproximada a 40 dB.

Serie temporal en Roble Americano para una parcela con aprovechamiento de corta final

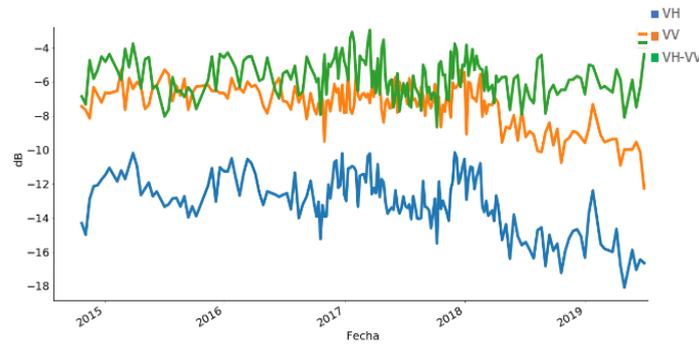


Figura 29. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Roble americano con aprovechamiento de corta final

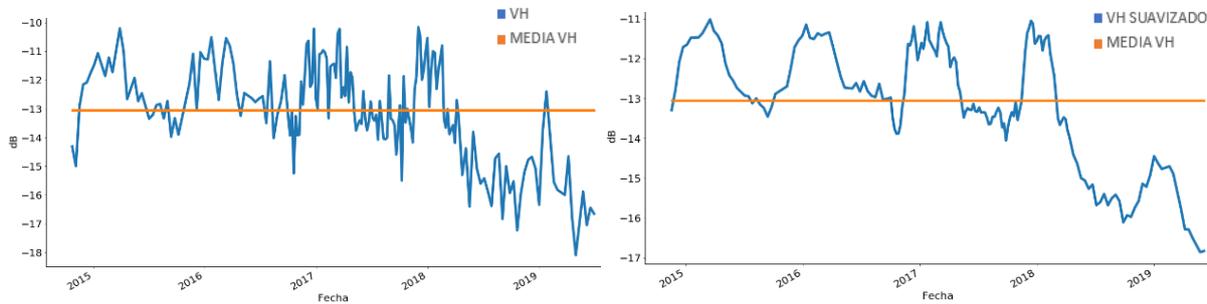


Figura 30. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Roble Americano con aprovechamiento de corta final (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

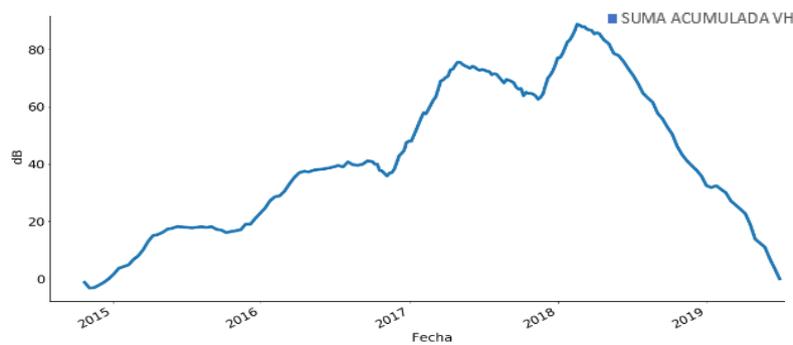


Figura 31. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Roble Americano con aprovechamiento de corta final

En este ejemplo se analizará el comportamiento de otra parcela de Roble Americano, pero en este caso el tipo de aprovechamiento será una corta final. Como ha sucedido en el caso mostrado anteriormente, se sigue manteniendo el mismo ciclo repetitivo anual, con valores de retrodispersión más altos para las estaciones de otoño e invierno (figura 30 izda). En esta ocasión, se aprecia de forma evidente que en la primavera de 2018, la retrodispersión sufre un descenso muy significativo que no corresponde con los ciclos observados hasta ese momento, lo que nos indica un posible cambio en la vegetación (figura 30 dcha). Al verificarlo en la gráfica de la suma acumulada (figura 31), vemos que efectivamente la suma lleva una progresión ascendente hasta esa fecha, desde la cual se cambia la tendencia y la gráfica comienza a descender. En este caso, la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo obtenido es de aproximadamente 90 dB.

Serie temporal en Pino Laricio para una parcela con aprovechamiento de clara

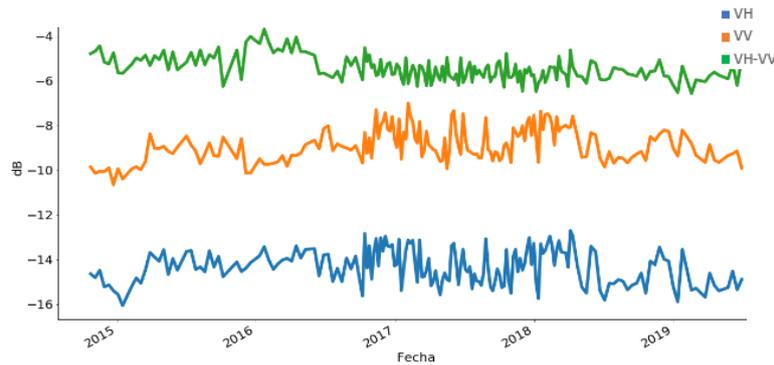


Figura 32. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Pino Laricio con aprovechamiento de clara

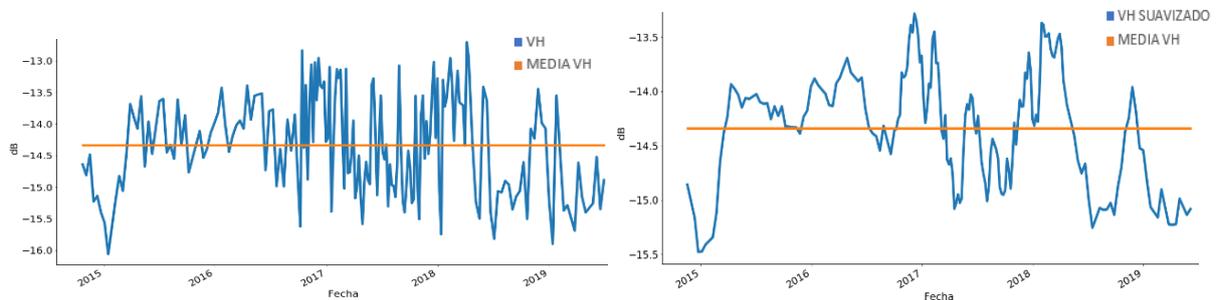


Figura 33. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Laricio con aprovechamiento de clara (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

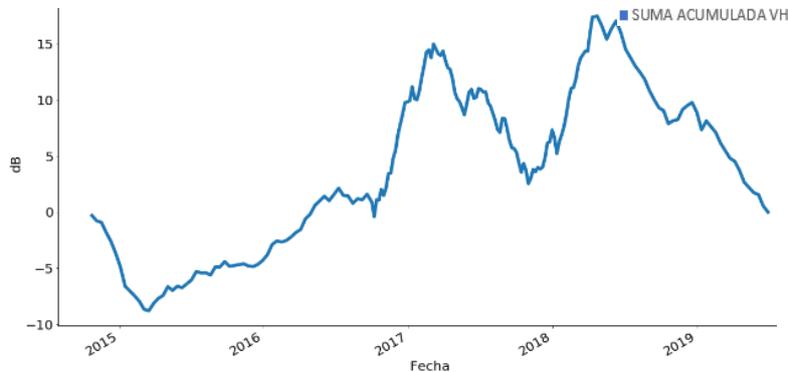


Figura 34. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Laricio con aprovechamiento de clara

Al igual que sucede con el resto de series temporales analizadas, la variación de retrodispersión entre las diferentes fechas cambia considerablemente, produciendo de este modo numerosos picos durante toda la serie (figura 33 izda). Al estudiar el comportamiento que sigue la retrodispersión en VH, vemos que no existe ninguna alteración significativa que nos permita intuir que se haya producido algún cambio, ya que sigue una trayectoria constante durante todo el periodo (figura 33 dcha). Al fijarnos en la suma acumulada, vemos que se producen algunos picos máximos y mínimos, con una diferencia máxima entre ellos de 25 dB (figura 34), valor relativamente bajo para predecir si se ha producido un cambio.

Serie temporal en Alerce para una parcela con aprovechamiento de corta final

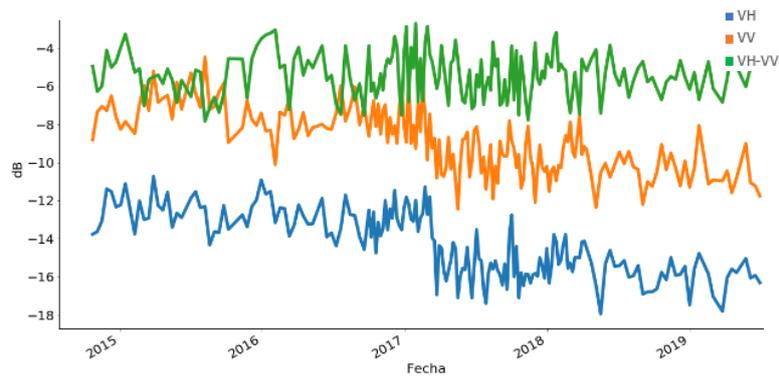


Figura 35. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Alerce con aprovechamiento de corta final

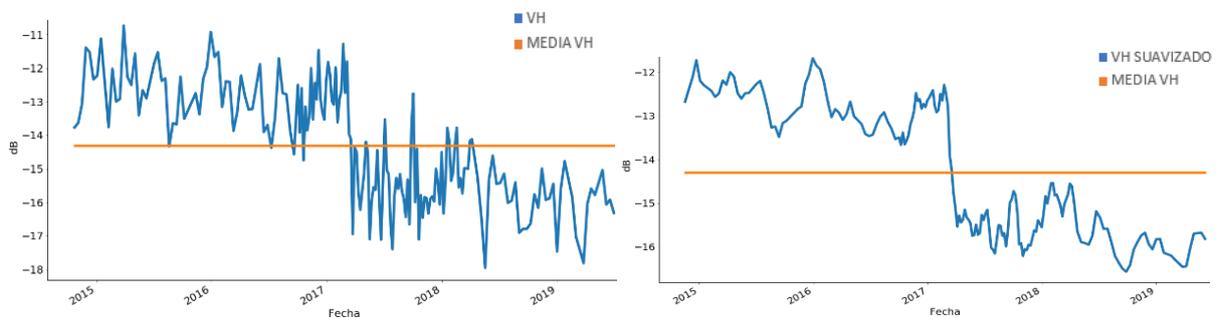


Figura 36. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Pino Alerce con aprovechamiento de corta final (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

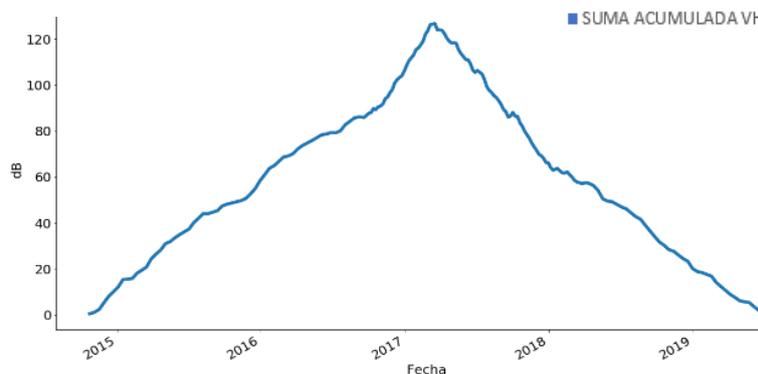


Figura 37. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Pino Alerce con aprovechamiento de corta final

La serie temporal que se analiza en este caso es de una corta final en una parcela de Alerce. Se aprecia que se producen numerosos picos, no obstante, se mantiene una evolución regular hasta que, en la primavera de 2017 sufre un gran descenso de los valores en la retrodispersión, siendo este descenso más significativo en la polarización VH (figura 36). En esta ocasión, este descenso de los valores se aprecia muy claramente en cualquiera de las gráficas analizadas para dicha polarización, concordando estos resultados observados, con la gran diferencia de máximos que se obtiene de la gráfica de la suma acumulada, que en este caso supera los 120 dB (figura 37).

Serie temporal en Encina para una parcela con aprovechamiento de clara

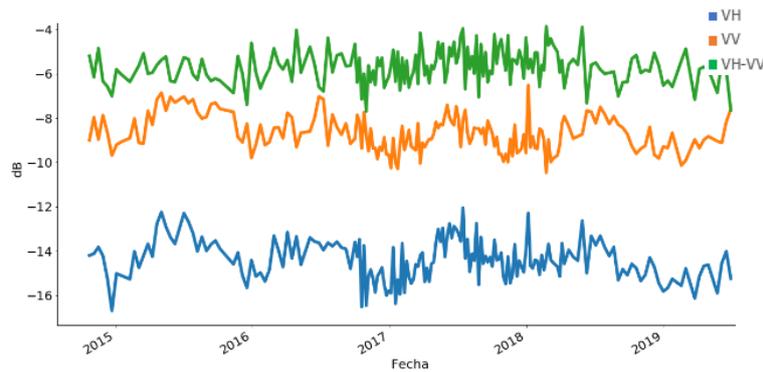


Figura 38. Serie temporal de la retrodispersión en VV, VH y VH/VV para una parcela de Encina con aprovechamiento de clara

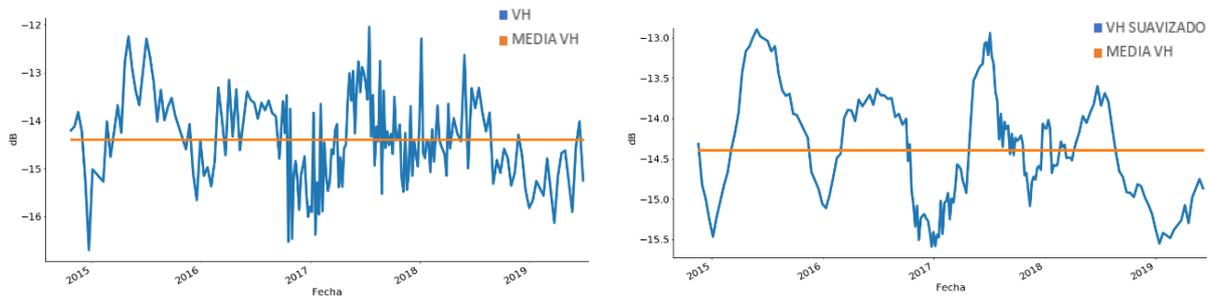


Figura 39. Serie temporal de la retrodispersión en VH para una parcela de Encina con aprovechamiento de clara (izda); y misma serie suavizada utilizando una media móvil (dcha)

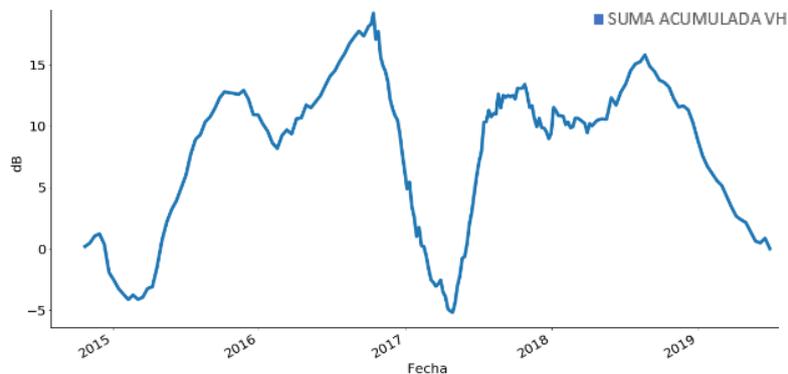


Figura 40. Suma acumulada de la retrodispersión en VH con respecto a la media para una parcela de Encina con aprovechamiento de clara

La serie temporal que se obtiene para esta parcela de Encina muestra un desarrollo regular para todo el periodo analizado, sufriendo pequeñas oscilaciones estacionarias que se repiten de forma periódica para cada año (figura 39 dcha). En este caso, es difícil predecir de forma visual si se ha producido algún tipo de cambio en la parcela. Cuando se analiza la gráfica de la suma acumulada (figura 40), se observa la presencia de varios picos máximos y mínimos, entre ellos se encuentra a principios de 2017 el pico con el valor más alto, seguido pocos meses después por el pico con el valor más bajo. A partir de esto se podría intuir que en ese periodo se ha realizado la clara, sin embargo, sería un supuesto que no se podría contrastar.

5.3.2 Representación y análisis de los diagramas de caja por especie y tipo de aprovechamiento forestal realizado

La finalidad de esta sección es mostrar gráficamente, a partir de diagramas de caja, la diferencia entre el valor máximo y mínimo (rango) de la suma acumulada de la distancia de cada valor de retrodispersión de la serie temporal con respecto a la media. Para representar esto se realizarán agrupaciones por especie y tipo de aprovechamiento realizado. Se analizarán los resultados para cada especie por separado.

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Pino Alepo

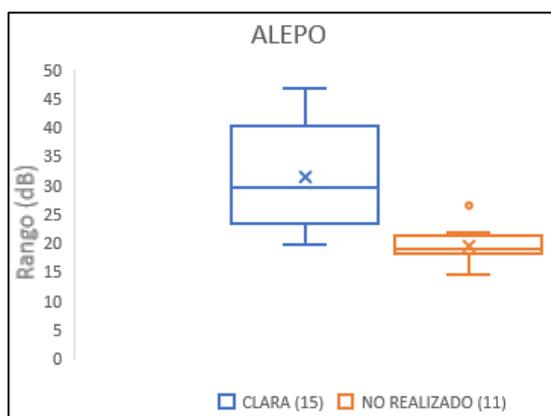


Figura 41. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Alepo

Para el Pino Alepo disponemos de muestras tanto de clara como de parcelas donde no se ha realizado ningún tratamiento. Podemos ver que las distancias máximas de la suma acumulada muestran diferencias significativas según se haya realizado clara o no, produciendo mayores variaciones en las muestras donde se ha realizado clara, con un valor de la mediana en torno a 30 dB, mientras que para las parcelas donde no se ha realizado ningún tratamiento, la mediana está en torno a 20dB (figura 41).

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Alerce

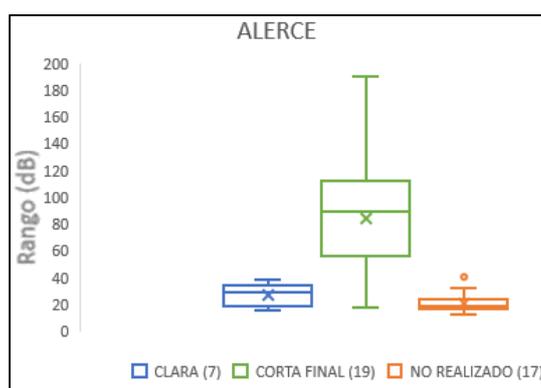


Figura 42. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Alerce

Para esta especie se analizarán las claras, cortas finales y parcelas sin tratamiento. Podemos ver que las distancias máximas que se producen en las parcelas de corta final son mucho mayores que para las otras dos variables, proporcionando una gran facilidad para identificar la realización de este tipo de aprovechamiento con un porcentaje muy alto de acierto (figura 42). Sin embargo, cuando

comparamos las claras con las parcelas donde no se han realizado tratamientos, vemos que los resultados obtenidos son mucho más semejantes, con un valor de la mediana algo superior para las claras, pero con muchos valores similares entre ambas que dificultaría una buena clasificación.

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Chopo

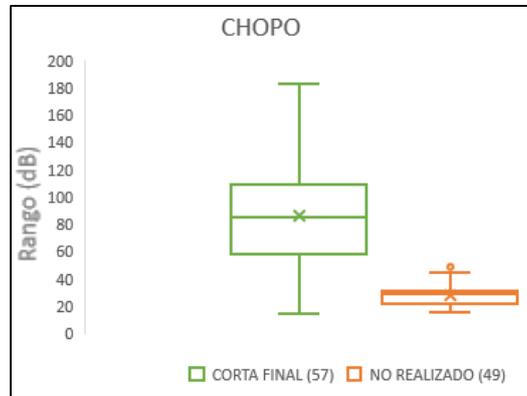


Figura 43. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Chopo

En el caso del Chopo, las distancias máximas de la suma acumulada muestra grandes diferencias para poder identificar las parcelas con cortas finales de las parcelas donde no se ha realizado ningún tipo de tratamiento. Para estas últimas, la mayoría de los valores oscilan entre 15 y 40 dB, mientras que para las muestras donde se ha realizado cortas finales, estos valores varían entre 40 y 160 dB en la mayor parte de las parcelas (figura 43).

Variaciones máximas de la suma acumulada para la Encina

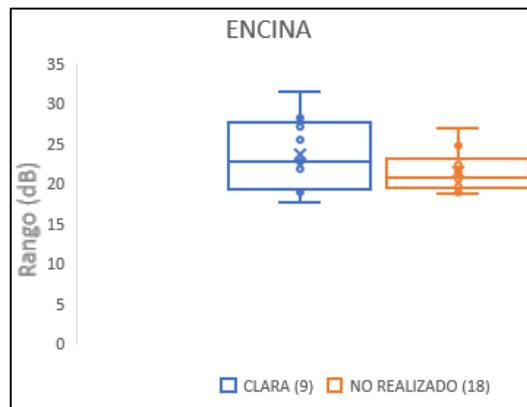


Figura 44. Diagramas de caja de la suma acumulada para la Encina

Las muestras de las que disponemos para Encina son de tratamientos de claras y de parcelas sin tratamiento. Observamos que para ambas variables la mayoría de los valores oscilan entre los 15 y 30 dB (figura 44), y pese a que la mediana para las muestras de clara tenga un valor más alto, resultaría difícil realizar una buena clasificación utilizando este método.

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Haya

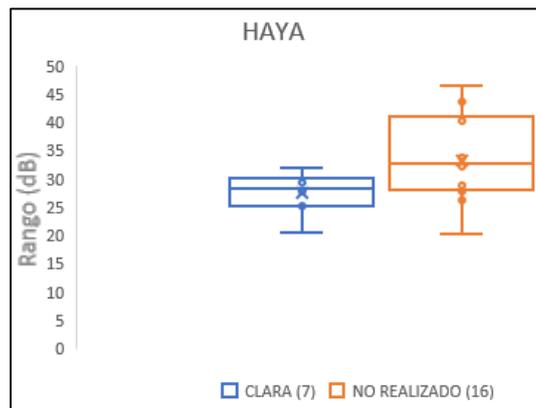


Figura 45. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Haya

Como sucedió con las muestras de Encina, los resultados obtenidos para el Haya en las parcelas de clara y las parcelas donde no se han realizado tratamientos son muy semejantes, con un rango de valores que se solapan entre sí (figura 45). Podemos ver que en las parcelas sin tratamiento, se obtiene un valor de la mediana cercano a 35 dB, cuando en los casos vistos hasta ahora la mediana siempre se encontraba próxima a los 20dB. Este aumento de la mediana para el Haya puede ser debido a que como es un árbol caducifolio, en otoño la caída de las hojas provoca mayores variaciones en la retrodispersión que luego se reflejan a la hora de calcular la suma acumulada. Con todo, la metodología aplicada no parece ser adecuada para detectar claras en esta especie.

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Pino Laricio

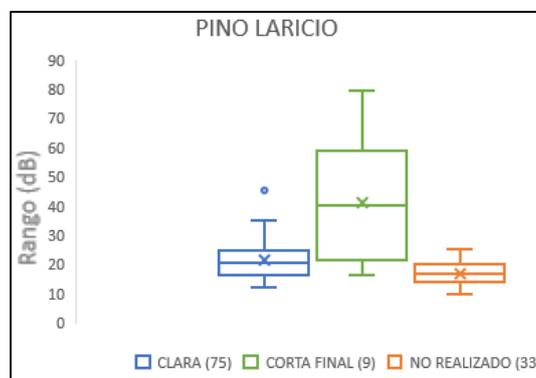


Figura 46. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Laricio

Tras examinar los diagramas obtenidos para el Pino Laricio, podemos llegar a la conclusión de que se logran resultados muy diferentes entre las parcelas de corta final, con una mediana en torno a los 40 dB, y las otras dos variables, con medianas mucho más bajas (15 dB para las parcelas sin tratamiento y 20dB para las claras) (figura 46). De este modo queda garantizado que para esta especie, este método que se ha utilizado permitiría identificar con gran eficiencia las cortas finales. Sin embargo, para la identificación de claras, los resultados no serían muy satisfactorios.

Variaciones máximas de la suma acumulada para otras coníferas

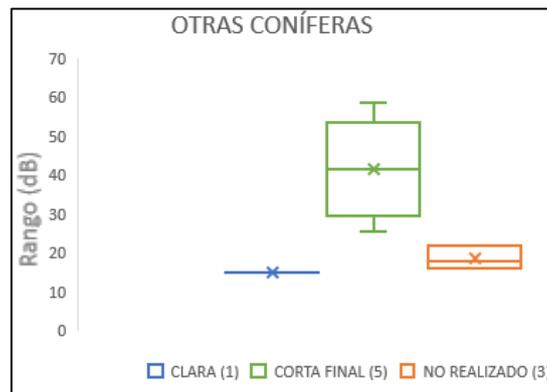


Figura 47. Diagramas de caja de la suma acumulada para otras coníferas

Como ya se ha mencionado anteriormente, las muestras de otras coníferas de las que disponemos son realmente reducidas como para realizar un análisis fiable, pese a eso, se puede apreciar la misma tendencia que sucede con el resto de especies. Las cortas finales obtienen los valores más altos, que varían entre los 25 y 60 dB, mientras que las claras y parcelas sin tratamientos oscilan entre los 15 y 25 dB (figura 47).

Variaciones máximas de la suma acumulada para otras frondosas

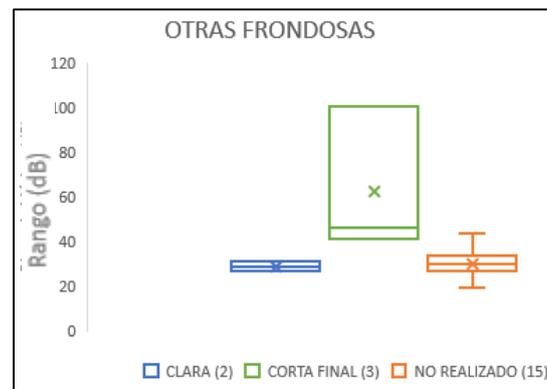


Figura 48. Diagramas de caja de la suma acumulada para otras frondosas

La tendencia observada hasta el momento parece que se corrobora con otro resultado más que sigue el mismo comportamiento. En este caso se analiza el grupo de otras frondosas, el cual no dispone de un número muy grande de muestras, pero resultan suficientes como para afirmar que las cortas finales se podrían detectar de forma satisfactoria y, sin embargo, las claras se confundirían con las parcelas sin tratamiento produciendo resultados poco precisos (figura 48).

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Pino Radiata

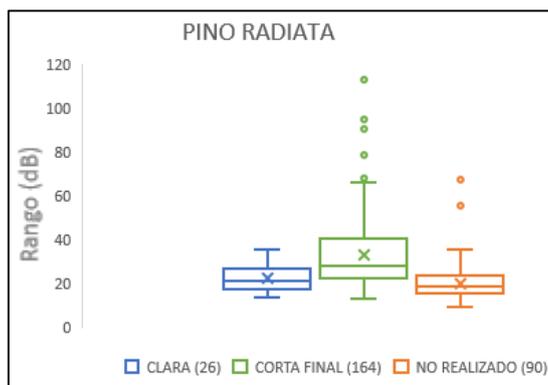


Figura 49. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Radiata

El Pino Radiata es la especie de la que más muestras se dispone, sin embargo, la mayoría de las parcelas están afectadas por diversas enfermedades que provocan la pérdida de parte de sus hojas o acículas, permitiendo de este modo que penetre hasta el terreno más cantidad de luz solar, lo que origina una mayor densidad en el sotobosque que pueda reducir la variación de la retrodispersión a la hora de realizar una corta. Por este motivo, los resultados obtenidos se interpretarán con cautela. Si nos fijamos en la mediana de la distancia máxima de la suma acumulada para la corta final, vemos que tenemos un valor realmente bajo en comparación con las otras especies, siendo este cercano a 30dB (figura 49). La causa de que se produzca este resultado, puede ser debida a que, ya desde un primer momento las parcelas a analizar estaban afectadas por las enfermedades, produciendo de este modo menor retrodispersión de volumen debido a la falta de hojas o acículas.

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Roble Americano

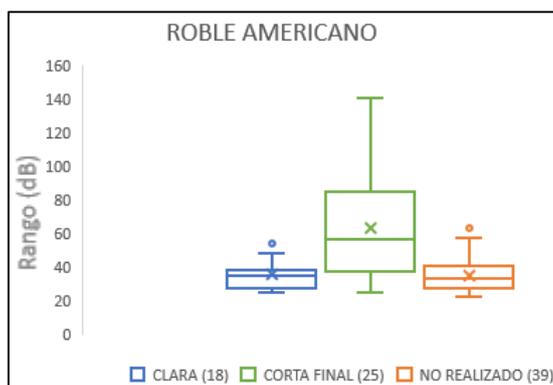


Figura 50. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Roble Americano

Los resultados obtenidos para el Roble Americano en las 3 variables a analizar nos dicen que los valores para la clara como para las parcelas sin aprovechamiento son prácticamente los mismos, lo que significa que desafortunadamente no es posible detectar si se ha producido algún cambio (figura 50). No obstante, la corta final tiene un rango de valores más alto, con una mediana cercana a los 60 dB. Podemos decir que se obtendrían buenos resultados si utilizamos este método para identificar cortas finales en esta especie.

Variaciones máximas de la suma acumulada para el Pino Silvestre

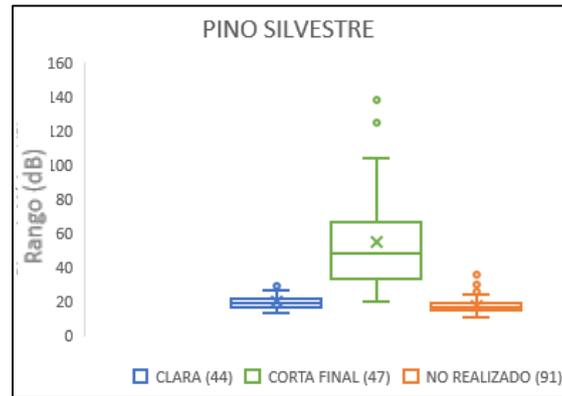


Figura 51. Diagramas de caja de la suma acumulada para el Pino Silvestre

Para finalizar este estudio se van a examinar los diagramas obtenidos para el Pino Silvestre (figura 51). Vemos que tanto para las claras como para las parcelas sin tratamiento, los resultados son prácticamente los mismos, con unos valores de mediana próximos a 20 dB. Por el contrario, las parcelas de corta final tienen una mediana cercana a 50 dB, y su rango de valores oscila entre 20 dB y 110 dB, estando concentrados la mayoría entre los 30 dB y 70 dB. Podemos afirmar que, para el Pino Silvestre sí es posible obtener resultados satisfactorios a la hora de identificar en que parcelas se han producido cortas finales.

6. CONCLUSIONES

El presente documento se centra en evaluar la capacidad del satélite Sentinel-1 para la detección de cambios en superficies forestales provocados por aprovechamientos forestales. Dentro de este contexto, se ha realizado un análisis para varias especies forestales en las tres polarizaciones disponibles (VH, VV, VH/VV), planteando tres objetivos principales. En primer lugar, se han analizado los valores de retrodispersión en la fecha inicial y fecha final para los diferentes tipos de aprovechamiento, con el fin de evaluar si existen cambios significativos en dichos valores, y en qué polarización esos cambios se manifiestan de una manera más notoria. Como segundo objetivo, se ha planteado identificar qué época del año sería la idónea para realizar el análisis de detección de cambios. Para ello se han comparado imágenes aniversario adquiridas en los distintos meses del año y se ha analizado la separabilidad existente en la retrodispersión entre el momento anterior y posterior a la realización del aprovechamiento. El tercer propósito propuesto se basa en estudiar la posibilidad de identificar si se ha producido algún tipo de aprovechamiento para cada muestra en particular, como también el momento de cuando se ha efectuado. Para llegar a este tercer objetivo, se ha analizado la serie temporal completa de todo el periodo, de donde se ha obtenido su media, y tras realizar la suma acumulada de cada valor de retrodispersión con respecto a esa media, se ha obtenido su variación máxima entre extremos, la cual se ha utilizado como indicador de la realización o no de aprovechamientos.

En cuanto a la variación de la retrodispersión antes y después de la realización del aprovechamiento y su separabilidad, los resultados muestran diferencias significativas para las muestras donde se han realizado cortas finales, algo que permitiría su detección. Sin embargo, no parece que las claras se puedan detectar fácilmente, ya que en la mayoría de los casos presentan variaciones similares a las parcelas donde no se ha realizado ningún tipo de aprovechamiento. Al comparar las tres polarizaciones, vemos que las variaciones más altas de retrodispersión se han producido en la polarización VH, lo cual indica su mayor eficacia para la detección de cambios en masas forestales. Este estudio se ha replicado considerando únicamente parcelas superiores a 0,5 hectáreas, aunque los resultados obtenidos han sido similares. Por lo tanto, no parece que el tamaño de la parcela sea un aspecto relevante en la capacidad de detección de aprovechamientos con estas imágenes.

En la serie temporal completa se aprecia una alta variabilidad entre fechas próximas que se puede suavizar con un filtro multitemporal de media móvil. Sin embargo, si interesase implementar una detección de cambios bitemporal utilizando imágenes aniversario, se percibe que lo mejor sería usar imágenes de primavera, ya que las mayores diferencias se observan en torno a marzo en la mayoría de las especies. Hay que mencionar que estos casos donde se ratifica este comportamiento, coinciden con las especies de las que se dispone de un número mayor de muestras, por ello la mayor relevancia del resultado. Una flaqueza de este estudio es el limitado número de muestras existentes para alguna especie, lo que puede dar lugar a resultados poco consistentes.

La técnica basada en el análisis de toda la serie temporal proporciona resultados muy satisfactorios en la mayoría de especies para la detección de cortas finales, resultando útil incluso para detectar la fecha del cambio. Los mejores resultados se han obtenido para especies como el pino silvestre, chopo, alerce, pino laricio y el grupo de otras frondosas. Por el contrario, los resultados no han sido tan claros para el pino radiata donde la metodología no ha permitido identificar claramente los cambios, deduciendo que es debido a la afección por varias plagas que sufre esta especie y que hace que pierda las hojas o acículas, provocando un sotobosque más denso que pueda reducir la variación de la retrodispersión a la hora de la corta. Para la detección de claras los resultados no son tan evidentes, su similitud con las muestras donde no se ha realizado tratamiento hace que sea difícil detectar este tipo de aprovechamiento. El análisis de la serie temporal completa ha permitido detectar secuencias periódicas anuales en las especies caducifolias, debido a la caída de las hojas.

A modo de resumen podemos concluir diciendo que este trabajo cumple con los objetivos planteados. Pese a que los resultados para la detección de claras no han sido los deseados, se logran unos resultados muy satisfactorios en la detección de cortas finales. De este modo queda demostrado el gran potencial que tiene el satélite Sentinel-1 a la hora de realizar estudios sobre masas forestales.

Considerando la continuidad de esta investigación en un futuro, sería interesante realizar un análisis estadístico para verificar de una forma cuantitativa los resultados obtenidos, incluso implementando herramientas de minería de datos. Como también analizar más en profundidad las sumas acumuladas obtenidas por especie, en función de su edad y otras características. Esto permitiría iniciar una línea de investigación que haga posible, a partir de clasificadores, identificar automáticamente la fecha de realización del aprovechamiento con resultados previsiblemente fiables. En definitiva, este trabajo es la base desde donde se puede partir para continuar investigando sobre la capacidad del satélite Sentinel-1 para monitorear y detectar cambios en superficies de masas forestales de pequeño tamaño. Estas investigaciones permitirían desarrollar herramientas para que empresas o las administraciones públicas puedan llevar un seguimiento de los aprovechamientos que se realicen en una determinada zona.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Stenger, P. Harou, and S. Navrud, "Valuing environmental goods and services derived from the forests," *J. For. Econ.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–14, 2009.
- [2] M. Whittle, S. Quegan, Y. Uryu, M. Stüewe, and K. Yulianto, "Detection of tropical deforestation using ALOS-PALSAR: A Sumatran case study," *Remote Sens. Environ.*, vol. 124, pp. 83–98, 2012.
- [3] D. Lawrence and K. Vandecar, "Effects of tropical deforestation on climate and agriculture," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 5, no. 1, pp. 27–36, 2015.
- [4] A. Ameztegui, L. Coll, L. Brotons, and J. M. Ninot, "Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain tree line in the Pyrenees," *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 25, no. 3, pp. 263–273, 2016.
- [5] Gobierno de Navarra, "Plan Forestal de Navarra," 1999. [Online]. Available: <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/ACCCD512-309A-4408-969C-A8972FB1F7E8/291939/PlanForestal.pdf>.
- [6] PEFC España, "Sistema español de certificación forestal," 2014. [Online]. Available: http://www.pefc.es/documentacion/sistema_PEFC/general/SisEspPEFCES_14_04_03_aprobadoPEFCC.pdf.
- [7] E. Chuvieco, "Teledetección ambiental," 2008, pp. 14–15.
- [8] J. Campbell and R. Wynne, "Introduction to Remote Sensing," 2011, pp. 4–6.
- [9] E. Chuvieco and A. Huete, "Fundamentals of satellite remote sensing," in *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*, 2009, pp. 70–85.
- [10] P. M. Cristiano *et al.*, "High NDVI and Potential canopy photosynthesis of South American subtropical forests despite seasonal changes in leaf area index and air temperature," *Forests*, vol. 5, no. 2, pp. 287–308, 2014.
- [11] I. Garonna, R. de Jong, and M. E. Schaepman, "Variability and evolution of global land surface phenology over the past three decades (1982-2012)," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 22, no. 4, pp. 1456–1468, 2016.
- [12] M. Rüetschi, M. E. Schaepman, and D. Small, "Using multitemporal Sentinel-1 C-band backscatter to monitor phenology and classify deciduous and coniferous forests in Northern Switzerland," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–30, 2018.
- [13] J. M. Kellndorfer, "Toward consistent regional-to-global-scale vegetation characterization using orbital sar systems," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 5 PART 1, pp. 1396–1411, 1998.
- [14] T. Schmugge, "Remote Sensing of Soil Moisture," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 21, no. 3, pp. 336–344, 1983.
- [15] F. T. Ulaby *et al.*, *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. 2014.
- [16] A. Bouvet, S. Mermoz, M. Ballère, T. Koleck, and T. Le Toan, "Use of the SAR shadowing effect for deforestation detection with Sentinel-1 time series," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 8, pp. 1–19, 2018.

- [17] N. Joshi *et al.*, "Mapping dynamics of deforestation and forest degradation in tropical forests using radar satellite data," *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 3, 2015.
- [18] C. M. Ryan *et al.*, "Quantifying small-scale deforestation and forest degradation in African woodlands using radar imagery," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 18, no. 1, pp. 243–257, 2012.
- [19] Unión Europea, "Copernicus: La mirada de Europa sobre la Tierra," 2015. [Online]. Available: https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2018-10/Copernicus_brochure_ES_web_Oct2017.pdf.
- [20] NASA SERVIR, "THE SAR HANDBOOK," 2019, pp. 21–79.
- [21] J. E. S. Fransson *et al.*, "Detection of forest changes using ALOS PALSAR satellite images," in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007, pp. 2330–2333.
- [22] P. L. Frison *et al.*, "Potential of Sentinel-1 data for monitoring temperate mixed forest phenology," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 12, 2018.
- [23] E. Tomppo, O. Antropov, and J. Praks, "Boreal forest snow damage mapping using multi-temporal sentinel-1 Data," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 4, pp. 1–20, 2019.
- [24] S. Lohberger, M. Stängel, E. C. Atwood, and F. Siegert, "Spatial evaluation of Indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using Sentinel-1," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 24, no. 2, pp. 644–654, 2018.
- [25] R. Torres *et al.*, "GMES Sentinel-1 mission," *Remote Sens. Environ.*, vol. 120, pp. 9–24, 2012.
- [26] K. Dasari, A. Lokam, P. V. Jayasri, and A. Prasad, "Importance of speckle filtering in image classification of SAR data," 2015, pp. 349–352.
- [27] J. Jaybhay and R. Shastri, "A Study of Speckle Noise Reduction Filters," *Signal Image Process. An Int. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 71–80, 2015.
- [28] S. Medasani and G. U. Reddy, "Analysis and Evaluation of Speckle Filters by Using Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data Through Local Statistics," in *Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 2018, pp. 169–174.
- [29] D. Small, "Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 8, pp. 3081–3093, 2011.
- [30] D. Small and A. Schubert, "Guide to ASAR Geocoding," p. 36, 2008.