



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y
BIOCIENCIAS**

**NEKAZARITZAKO INGENIARITZAKO ETA BIOZIENTZIETAKO GOI
MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA**

*VERIFICACIÓN DE APROVECHAMIENTOS FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES SENTINEL-2 DEL
PROGRAMA COPERNICUS*

Presentado por:

ERIKA CRISTINA SOLANO ROMERO

Director:

JESÚS ÁLVAREZ MOZOS

Codirectora:

ITSASO ARANGUREN ERICE

MASTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
*UNIBERTSITATE MASTERRA INFORMAZIO GEOGRAFIKOKO SISTEMETAN ETA
TELEDETEKZIOAN*



Septiembre, 2022

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. CONTEXTO.....	2
1.2. LA TELEDETECCIÓN Y LOS BOSQUES.....	3
1.3. SENTINEL-2.....	4
1.4. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS.....	5
1.4.1. Índices de Vegetación.....	6
2. OBJETIVOS.....	7
3. MATERIALES.....	8
3.1. ZONA DE ESTUDIO.....	8
3.2. ESPECIES FORESTALES Y TIPOS DE APROVECHAMIENTOS.....	9
3.3. IMÁGENES SENTINEL-2.....	13
4. METODOLOGÍA.....	14
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	14
4.1.1. Elección de los recintos forestales.....	14
4.1.2. Selección de las imágenes (años 2016 a 2019).....	15
4.1.3. Procesamiento de las imágenes.....	15
4.1.4. Cálculo de Índices de Vegetación.....	15
4.1.5. Generación de compuestos estacionales de verano.....	15
4.1.6. Imágenes derivadas.....	17
4.1.7. Elección de técnicas de detección de cambio.....	17
4.1.8. Extracción de datos de reflectividad.....	19
4.1.9. Aplicación de la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.....	19
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5.1. ANÁLISIS DE IMÁGENES DIFERENCIA.....	21
5.2. ANÁLISIS DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN.....	32
5.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	44
6. CONCLUSIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	66

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de polígonos de estudio en las comarcas forestales de Navarra.....	9
Figura 2. Polígonos totales por cada especie en los shapes de trabajo.....	11
Figura 3. Distribución de imágenes Sentinel-2 de Navarra.....	13
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología utilizada	14
Figura 5. Proceso de generación de compuesto estacional de verano	16
Figura 6. Histograma imagen diferencia NDVI de compuesto de verano 2017-2016	17
Figura 7. Procedimiento de cálculo de Componentes Principales.....	19
Figura 8. Recinto de Quercus con aprovechamiento de hecho y su variación gráfica	22
Figura 9. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Haya 2014-2016	23
Figura 10. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Quercus 2014-2016	24
Figura 11. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Otras Frondosas 2014-2016.....	26
Figura 12. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Pino Laricio 2014-2016.....	27
Figura 13. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Pino Silvestre 2014-2016	28
Figura 14. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Otras Coníferas 2014-2016.....	30
Figura 15. Recinto con aprovechamiento tipo hecho vs. recinto sin aprovechamiento	33
Figura 16. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Haya 2014-2016	34
Figura 17. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Quercus 2014-2016	35
Figura 18. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Otras Frondosas 2014-2016.....	37
Figura 19. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Pino Laricio 2014-2016.....	38
Figura 20. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Pino Silvestre 2014-2016	40
Figura 21. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Otras Coníferas 2014-2016.....	41
Figura 22. Porcentaje de varianza individual y acumulada de la PC1 a la PC16.....	45
Figura 23. Influencia de las variables (bandas) en cada componente	46
Figura 24. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Haya 2014-2016.....	48
Figura 25. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Quercus 2014-2016.....	49
Figura 26. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Otras Frondosas 2014-2016.....	51
Figura 27. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Pino Laricio 2014-2016	52
Figura 28. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Pino Silvestre 2014-2016.....	54
Figura 29. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Otras Coníferas 2014-2016.....	55

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de las bandas espectrales de Sentinel-2	4
Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de Índices de Vegetación utilizados en este trabajo.....	6
Tabla 3. Distribución de shapes y cantidad de polígonos.....	8
Tabla 4. Clasificación de especies forestales clase nivel 2	10
Tabla 5. Polígonos de estudio por especie forestal y tipo de aprovechamiento 2014-2016.....	12
Tabla 6. Polígonos de estudio por especie forestal y tipo de aprovechamiento 2016	12
Tabla 7. Polígonos de estudio por especie forestal y tipo de aprovechamiento 2017	12
Tabla 8. Fechas de imágenes Sentinel-2 procesadas de los años 2016 a 2019.....	13
Tabla 9. Resultado test de Kruskal Wallis para el Haya 2014-2016. Método Imágenes Diferencia.....	23
Tabla 10. Resultado test de Kruskal Wallis para el Quercus 2014-2016. Método Imágenes Diferencia	25
Tabla 11. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Frondosas 2014-2016. Método Imágenes Diferencia.....	26
Tabla 12. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Laricio 2014-2016. Método Imágenes Diferencia	27
Tabla 13. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Silvestre 2014-2016. Método Imágenes Diferencia.....	29
Tabla 14. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Coníferas 2014-2016. Método Imágenes Diferencia.....	30
Tabla 15. Resumen de identificación de aprovechamientos por especie y por bandas para el método de Imágenes Diferencia.....	31
Tabla 16. Resultado test de Kruskal Wallis para Haya 2014-2016. Método Coeficiente de Variación	34
Tabla 17. Resultado test de Kruskal Wallis para Quercus 2014-2016. Método Coeficiente de Variación	36
Tabla 18. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Frondosas 2014-2016. Método Coeficiente de Variación	37
Tabla 19. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Laricio 2014-2016. Método Coeficiente de Variación	39
Tabla 20. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Silvestre 2014-2016. Método Coeficiente de Variación	40
Tabla 21. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Coníferas 2014-2016. Método Coeficiente de Variación	41
Tabla 22. Resumen de identificación de aprovechamientos por especie y por banda para el método de Coeficiente de Variación.....	42
Tabla 23. Autovalores de Análisis de Componentes Principales	44
Tabla 24. Resultado test de Kruskal Wallis para Haya 2014-2016. Método PCA.....	48
Tabla 25. Resultado test de Kruskal Wallis para Quercus 2014-2016. Método PCA	50
Tabla 26. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Frondosas 2014-2016. Método PCA	51
Tabla 27. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Laricio 2014-2016. Método PCA	53
Tabla 28. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Silvestre 2014-2016. Método PCA	54
Tabla 29. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Coníferas 2014-2016. Método PCA	56
Tabla 30. Resumen de identificación de aprovechamientos por especie y por Componente Principal para el método PCA	56

RESUMEN

En este Trabajo Final de Máster se evalúa la capacidad de las imágenes satelitales Sentinel-2, para verificar aprovechamientos forestales en los bosques de Navarra. La información de partida corresponde a 1.963 polígonos de aprovechamientos, que se han autorizado entre los años 2014 y 2017, divididos en tres grupos que corresponden a claras, hechos (cortas definitivas) y recintos sin intervención de especies forestales. Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron compuestos de verano de las imágenes Sentinel-2 de los años 2016 a 2019 y se emplearon diferentes métodos de detección de cambios. Se realizó la extracción de estadísticas zonales de los recintos en función al método utilizado y se aplicó una prueba no paramétrica por especies en cada método, para evaluar las diferencias significativas entre los aprovechamientos. Los resultados obtenidos muestran que las cortas definitivas evidencian la mayor separabilidad en los tres métodos evaluados, principalmente en el pino silvestre. Por el contrario, el haya no presentó resultados significativos para la detección de aprovechamientos con las técnicas empleadas. El resto de especies presentaron resultados intermedios.

Palabras clave: Teledetección, Sentinel-2, aprovechamientos forestales, detección de cambios, extracción de estadísticas zonales.

ABSTRACT

This Master's thesis evaluates the capacity of Sentinel-2 satellite images to verify forest harvesting in the forests of Navarra. The starting information corresponds to 1.963 polygons, from 2014 to 2017, divided into three groups corresponding to clearings, definitive cuts and control polygons without intervention of forest species. Sentinel-2 summer composite images were obtained for the years 2016 to 2019 and employed different change detection methods. Zonal statistics of the polygons were extracted and a non-parametric test by species in each method was applied to evaluate the significance of results. The results obtained show that the final cuts, obtained the highest separability in the three methods evaluated, mainly for the Scots pine. On the other hand, the beech did not show significant results for the detection of harvesting with the techniques used. The rest of species provided intermediate results.

Key words: Remote sensing, Sentinel-2, forest harvesting, change detection, extraction of zonal statistics.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO

Los bosques se pueden definir como zonas con superficies mayores a 0.5 hectáreas, donde los árboles pueden llegar a alcanzar alturas mínimas de 2 a 5 metros en la madurez y la cubierta de sus copas es de al menos un 10% (FAO, 2004). Estos ecosistemas pueden estar constituidos por formaciones de árboles de varios pisos y maleza que cubre el suelo, así como de rodales jóvenes y plantaciones que se están regenerando natural o artificialmente (Chazdon et al., 2016).

En Navarra los bosques forman una parte importante de la cultura y forma de vida, siendo esta región una de las de mayor superficie forestal relativa en Europa. Navarra cuenta con un 64% de territorio forestal, donde 450.000 hectáreas corresponden a zonas arboladas y el resto a pastizales y matorrales (Gobierno de Navarra, 2021). Una de las especies con mayor presencia en esta región es el haya con aproximadamente 145.000 ha. Por su parte, el pino silvestre se encuentra en mayor proporción en los valles de Roncal y Salazar y, en la zona noroccidental, se encuentran bosques atlánticos mixtos con una gran cantidad de coníferas. La zona media y sur de Navarra se caracteriza por la presencia de robledales y matorrales, así como pinos laricios y pinos alepos (Pérez Marín, 1998). Además, en Navarra, en los últimos 20 años la superficie arbolada ha aumentado un 24%.

Los aprovechamientos forestales son actividades relacionadas con el uso directo de los recursos de los bosques, por ejemplo, la madera, la leña, los frutos, la caza, entre otras actividades de las que se obtiene un beneficio económico. También se incluyen las actividades relacionadas con el uso que se le da a la madera en la industria, comercialización y consumo (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2022). En el caso de Navarra, se consideran aprovechamientos los maderables y leñosos, pastos, caza, frutos, plantas aromáticas y medicinales, setas, trufas y productos apícolas.

En esta Comunidad Foral, aproximadamente el 55% de la superficie forestal cuenta con un plan de gestión específico. La mayor parte de la superficie ordenada pertenece a montes de propiedad pública. Un 96% de los montes ordenados son de titularidad de Entidades Locales y Patrimonio Forestal y el 4% restante son terrenos particulares (Gestión Ambiental de Navarra S.A., 2017). De acuerdo a la normativa forestal de Navarra, los aprovechamientos forestales en los montes se realizan bajo el carácter de recurso natural renovable, teniendo en cuenta su uso racional y su conservación (Ley Foral 13/1990).

Respecto a la madera y la leña se elaboran planes anuales de aprovechamiento y mejora para el caso de montes de titularidad pública, mientras que para la titularidad privada se habilita un catálogo de servicios donde se explica el procedimiento de solicitud. También se determina el volumen de árboles para la cubicación de madera para su venta. Para el año 2020 se aprovecharon un total de 241.091,01 m³ de madera en rollo. Las especies que mayor aprovechamiento maderable ofrecen son el haya con aproximadamente 80.000 m³, los pinos, destacando el pino laricio con alrededor de 50.000 m³ y otras coníferas con 15.000 m³ (Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra - ADEMAN, 2020).

Por otro lado, la biomasa forestal, se utiliza como fuente energética y se prioriza su uso en la renovación de instalaciones térmicas de edificios públicos. También se regula la recolección de setas y hongos que se ha convertido en una actividad de carácter más social y recreativo que productivo, donde se establecen procedimientos para su aprovechamiento (Gobierno de Navarra, 2021).

Este Trabajo de Fin de Máster fue realizado gracias a la colaboración de la empresa Foresna Zurgaia, que es una asociación forestal sin ánimo de lucro, creada en 1992 con la finalidad de prestar asistencia técnica y defender los intereses de los propietarios forestales, titulares de monte y gestores, ya sean personas físicas o empresas. Esta asistencia técnica, se realiza en toda la cadena de valor de los recursos y energías renovables de origen forestal, en las diferentes fases que el proceso implica y además se incluyen tecnologías de observación terrestre remota para la planificación territorial. Las actividades realizadas por esta empresa, están dentro del sector S3 de “Energías renovables y recursos” (Universidad Pública de Navarra, 2021).

Adicionalmente, también se obtuvo la ayuda de los colaboradores del proyecto FOREST-OBS de la Universidad Pública de Navarra, que tiene como objetivo investigar y desarrollar nuevas herramientas para la gestión forestal, que posibiliten el suministro de recursos y energía renovable, basadas en tecnologías aéreas y satelitales de observación de la tierra. Gracias a este equipo, se desarrollaron los scripts de Python utilizados en las diferentes fases de este trabajo.

1.2. LA TELEDETECCIÓN Y LOS BOSQUES

La teledetección generalmente se refiere a tecnologías para registrar la energía electromagnética que reflejan áreas u objetos de la superficie terrestre, los océanos o la atmósfera, mediante sensores instalados en plataformas aéreas o satelitales. Las propiedades de estos objetos o áreas, de acuerdo a sus niveles de energía electromagnética, brindan una forma de identificarlos y distinguirlos. Una de las grandes ventajas de la teledetección, es la posibilidad de que las áreas geográficas de interés se inspeccionan en un ciclo regular, lo que facilita la adquisición de datos que revelan condiciones cambiantes en estas áreas a lo largo del tiempo y permiten caracterizar sucesos como, por ejemplo, el crecimiento o el estado de salud de la vegetación (Khorram et al., 2012).

Por medio de la teledetección, es posible realizar una contribución al estudio del cambio climático, donde los bosques tienen un papel muy importante. Según los objetivos del desarrollo sostenible (Organización de las Naciones Unidas- ONU, 2015) relacionados con la acción por el clima y la vida de los ecosistemas terrestres, una de las mayores afectaciones en estos ecosistemas es la deforestación, cuyos indicadores de monitoreo pueden ser derivados de actividades relacionadas con la observación terrestre (Kavvada et al., 2020).

De acuerdo a dichos objetivos, los bosques son de importancia vital y tienen un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático. Desde 1990 se han perdido aproximadamente 420 millones de hectáreas de bosques debido a actividades como la expansión agrícola, la intensificación de tierras de cultivo, el pastoreo y la urbanización (Song et al., 2018). Además, la restauración es esencial para reducir los riesgos para la economía y la vulnerabilidad de las especies (Organización de las Naciones Unidas- ONU, 2015).

Esta lucha contra la deforestación, ha llevado a reforestar zonas de bosques nativos deforestados con plantaciones de varias especies, aunque, estas plantaciones no restauran por completo la biodiversidad. A nivel mundial se han plantado al menos 1400 millones de árboles desde 1961 con la finalidad de aprovecharlos comercialmente, pero estas especies no nativas, pueden volverse dominantes acabando con la biodiversidad originaria y amenazando otras especies que dependen de estos bosques, entre ellas, los humanos (Gurevitch, 2022).

Gracias al desarrollo de la teledetección satelital, desde hace más de 50 años se ha podido tener un mayor conocimiento del total de superficie deforestada y monitorear cambios en general de la superficie terrestre, donde el 60% de estos cambios se atribuyen a actividades humanas y 40% al cambio climático como actor indirecto (Song et al., 2018). Este tipo de herramientas de observación terrestre, permiten realizar comparaciones temporales y fortalecer a las entidades encargadas que ven en la teledetección un moderno y atractivo instrumento para controlar las acciones en contra del cambio climático (Lanly, 2003).

1.3. SENTINEL-2

En este caso, se trabajó con imágenes de la misión Sentinel-2 del programa Copernicus. Esta misión fue lanzada el 23 de junio de 2015 con el satélite S-2A y posteriormente el 07 de marzo de 2017 se lanzó el segundo satélite S-2B. Estos dos satélites se encuentran en órbita polar colocados en la misma órbita heliosíncrona, desfasados de 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la superficie terrestre, teniendo en cuenta el amplio ancho de franja (290 km) y el alto tiempo de revisita que corresponde a 10 días en el Ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias (European Space Agency, 2020).

Las imágenes Sentinel-2 cuentan con 13 bandas espectrales: cuatro bandas a 10 metros, seis bandas a 20 metros y tres bandas a 60 metros de resolución espacial. A continuación, se presentan las principales características de estas imágenes:

Tabla 1. Especificaciones de las bandas espectrales de Sentinel-2

SENTINEL-2			
Resolución Espacial	10m	20m	60m
Bandas y Longitud de Onda (μm)	<ul style="list-style-type: none"> • B02 (Azul): 0.45-0.52 μm • B03 (Verde): 0.54-0.57 μm • B04 (Rojo): 0.65-0.68 μm • B08 (NIR-1): 0.78-0.90 μm 	<ul style="list-style-type: none"> • B05 (Red Edge 1): 0.69-0.71 μm • B06 (Red Edge 2): 0.73-0.74 μm • B07 (Red Edge 3): 0.77-0.79 μm • B08A (NIR-2): 0.85-0.87 μm • B11 (SWIR-1): 1.56-1.65 μm • B12 (SWIR-2): 2.10-2.28 μm 	<ul style="list-style-type: none"> • B01 (Aerosol): 0.43-0.45 μm • B09 (Water vapour): 0.93-0.95 μm • B10 (Cirrus): 1.36-1.39 μm
Resolución Radiométrica	12 bits		

Sentinel-2 tiene disponibles productos en nivel 1C y en nivel 2A. Las imágenes 1C se encuentran ortorrectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (TOA), mientras que las imágenes 2A se encuentran ortorrectificadas con niveles de reflectancia en superficie (BOA) que corresponden a imágenes corregidas atmosféricamente. En consecuencia, estas últimas imágenes son más nítidas y no presentan efectos visuales por la presencia de la atmósfera.

Las imágenes con un nivel de procesamiento 2A pueden descargarse directamente desde la página oficial de Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu>), pero no todas las fechas cuentan con este nivel de procesamiento, sin embargo, a partir de imágenes en nivel 1C es posible realizar una corrección atmosférica mediante el procesador Sen2Cor u otros procesadores como CorA, iCOR y FORCE, basados en diferentes algoritmos (Doxani et al., 2018), donde se realiza una corrección atmosférica de los datos de radiancia y se obtiene la correspondiente reflectancia en superficie; además los píxeles defectuosos y saturados se excluyen y se genera una clasificación automática de las escenas que asigna

los píxeles a una de las once clases genéricas (0: No Data, 1: Defectuoso, 2: sombras topográficas, 3: sombras de nubes, 4: vegetación, 5: suelos desnudos, 6: agua, 7: sin clasificar, 8: nubes-probabilidad alta, 9: nubes-probabilidad baja, 10: nubes altas, 11: nieve) (Pérez et al., 2018).

Dentro de las aplicaciones que ofrece la misión Sentinel-2, se busca apoyar los proyectos del programa Copernicus entre los que se encuentran el monitoreo marítimo, la gestión de emergencias, la seguridad y el monitoreo terrestre. En esta última, se incluye la planificación espacial, la gestión del agua, la agricultura y la gestión forestal que es el tema de interés en este trabajo.

1.4. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

La detección de cambios es el proceso que permite identificar diferencias en el estado de un objeto o área terrestre mediante su observación en distintos momentos. Este proceso involucra el uso de conjuntos de datos multitemporales para analizar cuantitativamente los efectos temporales de un fenómeno. Adicionalmente, gracias a la adquisición constante de datos y los formatos digitales, las imágenes satelitales se han convertido en la principal fuente de datos para diferentes aplicaciones de detección de cambios durante las últimas décadas (Lu et al., 2004).

La detección de cambios es útil para analizar distintos procesos de cambio en la superficie terrestre, usos de la tierra, asentamientos urbanos y la deforestación. De acuerdo a Ruiz Fernández (2017), el proceso metodológico general para la aplicación de técnicas de detección de cambios es el siguiente:

1. Adquisición y preprocesado de los datos

Hace referencia a la búsqueda de imágenes según las fechas pre y post evento, la adaptación de formatos, el recorte de las áreas de interés y la formación de mosaicos.

2. Correcciones geométricas y radiométricas

Las correcciones geométricas se refieren a la georreferenciación o rectificación absoluta de las imágenes, incluyendo un modelo digital de elevaciones, principalmente en zonas montañosas con la finalidad de corregir las distorsiones del relieve. Por otro lado, las correcciones radiométricas son las relacionadas con la reducción de los efectos atmosféricos entre las diferentes fechas y la calibración de los sensores.

3. Análisis de detección de cambios

Consiste en la adecuada selección del algoritmo o del método de análisis de detección de cambios que se va a emplear. Existe una gran variedad de métodos de detección de cambios, entre ellos: técnicas basadas en el análisis visual, técnicas con información cualitativa (temática) y técnicas que utilizan información cuantitativa como, por ejemplo, el coeficiente de variación, el análisis de componentes principales y las imágenes diferencia (González de Audicana, 2016), que son los tres métodos que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo.

Estas técnicas se pueden basar en las propias bandas espectrales de Sentinel-2 o en bandas derivadas, como, por ejemplo, los índices de vegetación (NDVI, NDII, NBR, etc.).

1.4.1. Índices de Vegetación

Los índices de vegetación son un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia a distintas longitudes de onda, con la finalidad de extraer de éstos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia del suelo y de las condiciones atmosféricas (González de Audícana, 2022a).

Los índices de vegetación se han utilizado ampliamente para evaluar las variaciones en los estados fisiológicos y las propiedades biofísicas de la vegetación (Sonobe et al., 2018).

Dentro del enfoque multitemporal, los índices NDVI, NDII y NBR (se describen a continuación), han sido ampliamente probados y utilizados. Estos tres índices calculan la diferencia normalizada entre dos bandas espectrales y su valor varía en función de las bandas utilizadas, lo que refleja distintas características del entorno (Carlà et al., 2009)

A continuación, se resumen las ecuaciones para el cálculo de los tres índices de vegetación mencionados anteriormente:

Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de Índices de Vegetación utilizados en este trabajo

NDVI	NDII	NBR
$NDVI = \frac{\rho_{NIR1} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR1} + \rho_{Rojo}} \quad (1)$	$NDII = \frac{\rho_{NIR1} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR1} + \rho_{SWIR1}} \quad (2)$	$NBR = \frac{\rho_{NIR1} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{NIR1} + \rho_{SWIR2}} \quad (3)$

El Normalized Difference Vegetation Index o NDVI (Rouse et al., 1974), es el índice de vegetación tradicional utilizado por los investigadores para extraer la abundancia de vegetación a partir de datos de detección remota. Divide la diferencia entre los valores de reflectancia en las longitudes de onda del rojo visible y el infrarrojo cercano por la suma de la reflectancia en esas mismas longitudes de onda, lo que da una estimación de la abundancia de vegetación verde (Rahman et al., 2004).

Los valores de este índice varían de -1 a 1 y el rango habitual para cubiertas vegetales es entre 0,2 y 1.

El Normalized Difference Infrared Index o NDII propuesto por Hunt & Rock (1989), se correlaciona con el contenido de agua de la vegetación. Los valores más altos del NDII están asociados con una mayor cantidad de agua contenida en las hojas. En caso de defoliación o pérdida de hojas, lo normal es que el índice disminuya (de Beurs & Townsend, 2008). Este índice puede ser un indicador útil para diferenciar especies de hoja caduca (caducifolios) como los robles y las hayas ya que las bandas NIR y SWIR utilizadas para su cálculo, son las bandas necesarias para obtener indicadores de humedad del hábitat formado por las copas de los árboles de un bosque y pueden caracterizar mejor las variaciones fotosintéticas en arbustos de hoja caduca o en sequía (Rodríguez & Bullock, 2013).

El Normalized Burn Ratio o NBR (Key & Benson, 2003), es el resultado de normalizar la diferencia de reflectancias entre una banda del infrarrojo (IR) cercano y una del infrarrojo medio. El contraste entre las reflectancias de estas bandas está relacionado con la presencia de vegetación viva (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 2017). Aunque es un índice utilizado generalmente para la detección de áreas quemadas, también es útil para identificar perturbaciones del bosque asociadas a la extracción selectiva de madera (Rojas, 2019).

Este índice también ha sido utilizado en estudios de aprovechamientos forestales para identificar y caracterizar diferentes prácticas de cosecha reportadas en registros de cosecha establecidos, incluyendo tala rasa, tala rasa con residual y tala parcial, donde la variación de magnitud de los diferentes aprovechamientos se refiere a la diferencia espectral del NBR antes y después del evento de las cosechas (Jarron et al., 2017).

Existen diversos estudios que han evaluado la efectividad de las imágenes Sentinel-2 para la detección de aprovechamientos forestales. Uno de estos estudios fue realizado por Xulu et al., (2020), en Kwambonambi, Sudáfrica, donde los bosques de plantación de eucalipto suelen ser talados con frecuencia. Se utilizaron polígonos vectoriales de áreas de tala rasa con la finalidad de probar si los datos Sentinel-2 de alta densidad, podían servir para detectar dichos aprovechamientos con precisiones comparables a las obtenidas a través de inventarios forestales. Mediante el entorno de nube de Google Earth Engine (GEE) se procesaron las imágenes y mediante una técnica Random Forest, se determinó que en los índices de vegetación NDVI y NDII, los valores fueron consistentes durante la etapa de bosque maduro, pero disminuyeron abruptamente después de la tala, evidenciando la efectividad de las imágenes Sentinel -2 en este tipo de análisis.

Con base en todos los apartados descritos anteriormente, este trabajo se centró en la verificación de aprovechamientos forestales con imágenes Sentinel-2, aplicando técnicas de detección de cambios y analizando los resultados obtenidos.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo Final de Máster es evaluar la posibilidad de detectar aprovechamientos forestales realizados en Navarra mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2 del programa Copernicus. Para ello se aplican distintas técnicas de detección de cambios, tomando como base un conjunto de 1.963 polígonos con autorizaciones de aprovechamiento concedidas por el Gobierno de Navarra entre 2014 y 2017.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Aplicar diferentes métodos de detección de cambios para identificar las diferencias de los aprovechamientos forestales en los compuestos de verano de los años 2016 a 2019.
- Evaluar las estadísticas zonales extraídas de cada recinto para determinar qué método proporciona los mejores resultados para cada especie y para cada aprovechamiento.
- Establecer si los resultados son estadísticamente significativos mediante la aplicación de una prueba no paramétrica.

3. MATERIALES

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio donde se desarrolló este trabajo, corresponde al conjunto de polígonos de la Comunidad Foral de Navarra, autorizados a propietarios particulares y comunales por el Gobierno, para realizar aprovechamientos forestales entre los años 2014 a 2017. Estos polígonos se dividen en tres archivos vectoriales de la siguiente manera:

Tabla 3. Distribución de shapes y cantidad de polígonos

Shape	Cantidad de Polígonos
Aprov_2014_2016_verf	939
Aprov_2016_verf	423
Aprov_2017_verf	601
Total	1.963

En total son 1.963 polígonos que corresponden a un área total de 8.787 Hectáreas (ha) y se distribuyen espacialmente por la totalidad de la superficie forestal de Navarra.

Debido a la diversidad de sistemas forestales, condiciones climáticas y edáficas, Navarra se divide en tres comarcas forestales. En la zona noroccidental, se encuentra la comarca Cantábrica con una superficie total de 186.834 ha, de las cuales, 153.240 ha (82%), corresponden a superficie forestal según el mapa de Cultivos y aprovechamientos de Navarra. Esta región cuenta con moderación térmica y altos niveles de humedad y precipitación, otorgando a esta zona un gran potencial productivo. Su clima es marítimo de costa occidental con abundantes lluvias, nieblas y lloviznas que la enmarcan como la zona más lluviosa de Navarra (Gestión Ambiental de Navarra- Servicio de Montes, 2015a)

La zona nororiental corresponde a la comarca Pirenaica que abarca una superficie total de 231.193 ha, con una superficie forestal de 196.099 ha, (~84%). Es una zona montañosa con bajas temperaturas invernales y condiciones climáticas más continentales, sin embargo, hacia la parte sur, el clima es marítimo de costa, reflejando una buena distribución de especies vegetales gracias a la variación del clima (Gestión Ambiental de Navarra- Servicio de Montes, 2015b).

Finalmente, se encuentra la comarca de la Zona media y Ribera que cuenta con una superficie total de 621.083 ha, donde 254.745 ha (41%) son áreas forestales. Su principal característica son los matices climáticos divididos en tres zonas: la zona Atlántica que cuenta con abundantes lluvias; la zona media, donde existen climas de transición entre el oceánico del norte y el mediterráneo del sur de Navarra, con veranos secos; y la zona Sur, que tiene precipitaciones escasas y veranos cálidos y secos (Gestión Ambiental de Navarra- Servicio de Montes, 2015c)

A continuación, se muestra la distribución de los polígonos de estudio en las diferentes comarcas de Navarra:

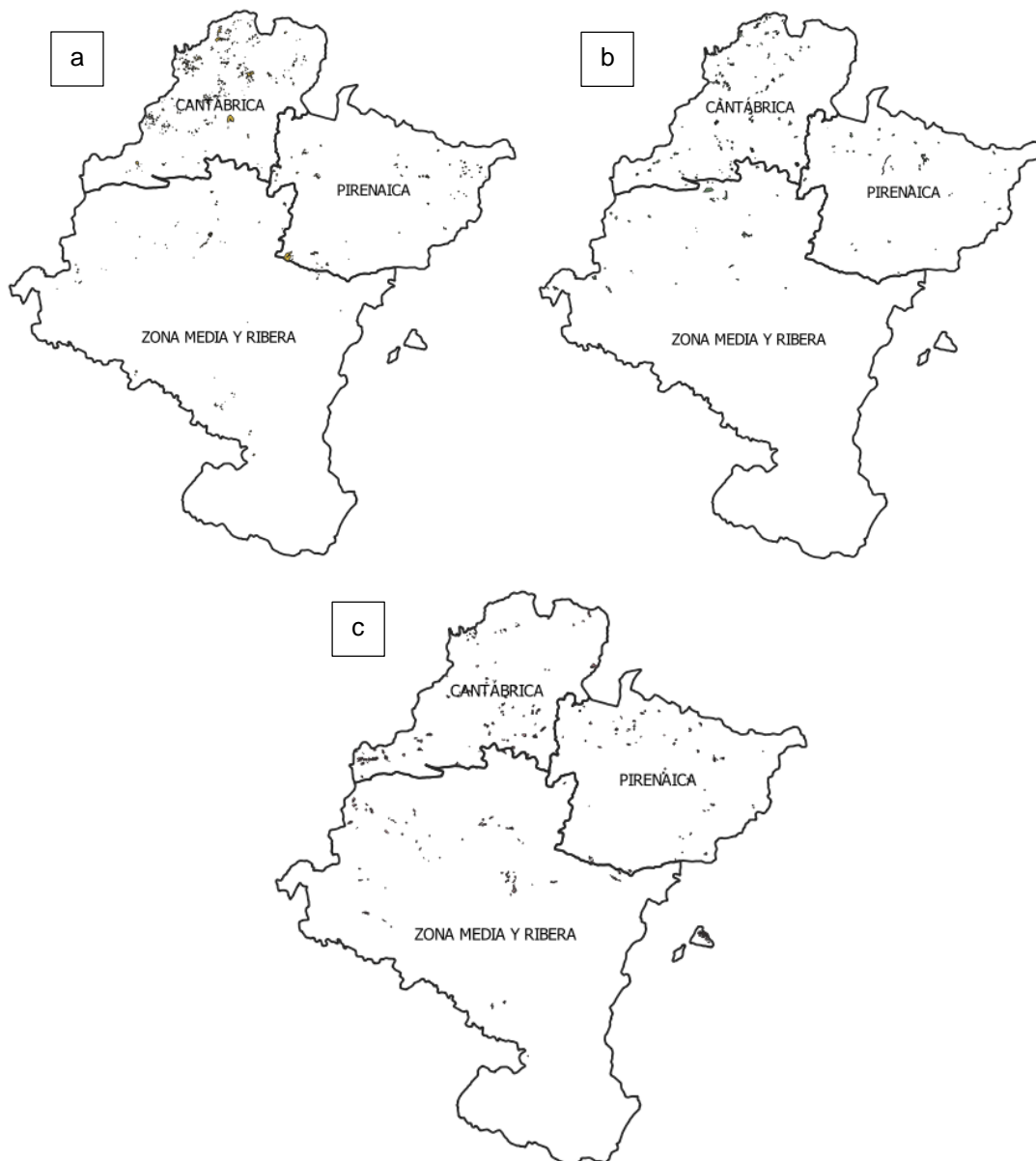


Figura 1. Distribución de polígonos de estudio en las comarcas forestales de Navarra. (a) Polígonos de 2014-2016, (b) Polígonos de 2016 y (c) Polígonos de 2017

3.2. ESPECIES FORESTALES Y TIPOS DE APROVECHAMIENTOS

Se realizaron 8 agrupaciones de especies forestales, las cuales contaban con aprovechamientos autorizados desde el año 2014 al 2017. Estas agrupaciones, fueron efectuadas por los especialistas de Foresna, quienes llevaron a cabo esta clasificación (llamada “Nivel 2”) de acuerdo a la especie, a su aprovechamiento comercial y a su interés económico para Navarra. Se tomó este periodo de tiempo, ya que desde el año 2016 se cuentan con imágenes completas de la misión Sentinel-2 y adicionalmente, una vez se autoriza el aprovechamiento, el propietario dispone de un plazo de dos años para que éste sea ejecutado, por lo tanto, los aprovechamientos de 2014 se podrían verificar a partir de las imágenes capturadas en 2016, así como aquellos autorizados hasta el año 2017 mediante las imágenes de 2019.

Las 8 agrupaciones se encuentran en la siguiente tabla suministrada por Foresna con el total de recintos entregados, en donde en color naranja se resaltan las especies seleccionadas para este trabajo:

Tabla 4. Clasificación de especies forestales clase nivel 2

Clase Nivel 2	Especies que componen cada clase	Suma de Sup (ha)	Suma de N° recintos
Haya (Fagus sylvatica)	<ul style="list-style-type: none"> Haya (Fagus sylvatica) 	2.620,511	284
Quercus	<ul style="list-style-type: none"> Carrasca (Quercus rotundifolia) Roble pubescente (Quercus pubescens) Roble pedunculado (Quercus robur) Quejigo (Quercus faginea) Carrascal-Robledal Roble americano (Quercus rubra) Marojo (Quercus pyrenaica) Roble albar (Quercus petraea) Encina (Quercus ilex) 	1.242,196	223
Frondosas nobles	<ul style="list-style-type: none"> Castaño (Castanea sativa) Arce (Acer sp.) Nogal (Juglans regia) Fresno común (Fraxinus excelsior) Cerezo (Prunus sp.) Fresno de hoja estrecha (Fraxinus angustifolia) 	285,614	11
Otras frondosas	<ul style="list-style-type: none"> Hayedo-Robledal Chopo y álamo (Populus sp.) Espino (Crataegus sp.) Acacia (Robinia pseudoacacia) Tamariz (Tamarix sp.) Aliso (Alnus sp.) Avellano (Corylus avellana) Plátano (Platanus hybrida) Abedul (Betula celtiberica, B.pendula) Sauce (Salix sp.) Olmo (Ulmus sp.) Liriodendron tulipifera Serbal (Sorbus sp.) Almez (Celtis australis) Otras mezclas de frondosas 	193,439	171
Pino laricio (Pinus nigra)	<ul style="list-style-type: none"> Pino laricio (Pinus nigra) 	1.705,022	332
Pino silvestre (Pinus sylvestris)	<ul style="list-style-type: none"> Pino silvestre (Pinus sylvestris) 	591,720	252
Pino silvestre-Hayedo	<ul style="list-style-type: none"> Pino silvestre-Hayedo 	-	-
Pino silvestre-Robledal	<ul style="list-style-type: none"> Pino silvestre-Robledal 	-	-
Pino carrasco (Pinus halepensis)	<ul style="list-style-type: none"> Pino carrasco (Pinus halepensis) 	320,089	35
Otras coníferas	<ul style="list-style-type: none"> Alerce (Larix sp.) Pino insigne (Pinus radiata) Mezcla de coníferas Abeto Douglas (Pseudotsuga menziesii) Pino negro (Pinus uncinata) Abeto blanco (Abies alba) Abeto rojo (Picea abies) Ciprés (Cupressus sp.) Sequoia sempervirens Criptomeria japónica Ciprés de Lawson (Chamaecyparis lawsoniana) 	1.828,779	655

	<ul style="list-style-type: none"> • Cedro (Cedrus sp.) • Pino estrobus (Pinus strobus) • Pino marítimo (pinus pinaster) • Pinus tadea • Pino piñonero (Pinus pinea) • Pino banksiana (Pinus banksiana) • Picea de Sitka (Picea sitchensis) 		
Otras mezclas mixtas	<ul style="list-style-type: none"> • Hayedo-Abetal • Otras mezclas mixtas 	-	-
Total general		8.787,370	1.963

Ya que la información vectorial fue proporcionada por Foresna, ésta ya contaba con la verificación de los aprovechamientos ejecutados (realizada por fotointerpretación), así, que solo fue necesario incluir un campo en las tablas de atributos que permitiera definir la misma estructura de agrupación de especies en todos los polígonos.

A continuación, se muestra la cantidad de polígonos totales por especie (1.963 polígonos) y su área calculada:

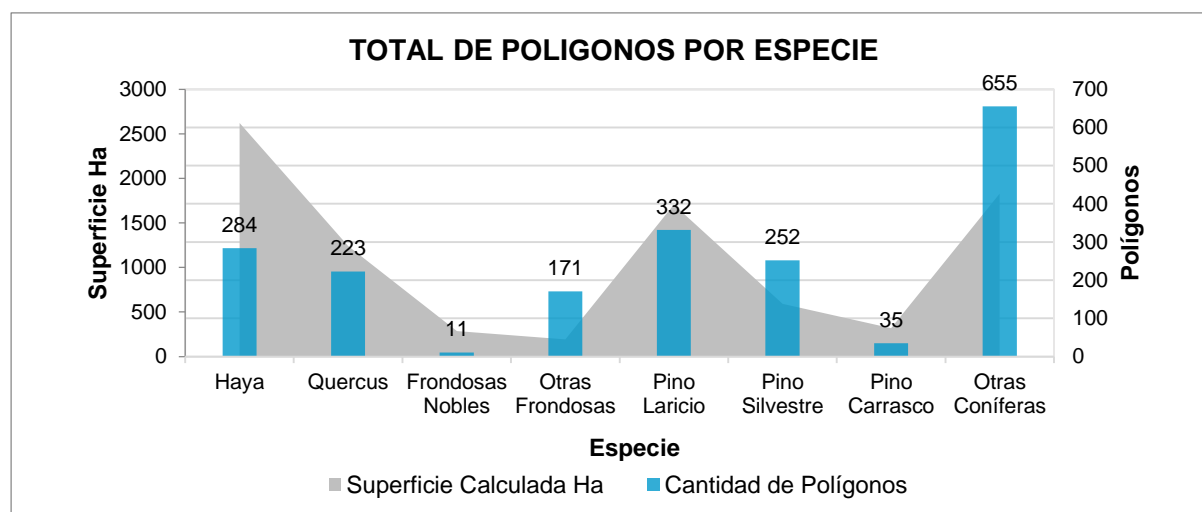


Figura 2. Polígonos totales por cada especie en los shapes de trabajo.

Estos polígonos cuentan con una clasificación de aprovechamientos de la siguiente manera: corta a hecho, clara y no realizado. La corta a hecho hace referencia a la eliminación de todos los pies de un recinto en una única intervención, es decir su extracción total en un corto periodo de tiempo.

Las claras son cortas que se realizan en la fase temprana de las masas forestales con la finalidad de mejorar la masa que queda en pie y de obtener productos comerciales. Las claras permiten disminuir la competencia entre árboles y estimular el crecimiento de los ejemplares que quedan en pie (Castillo et al., 2003).

Además de estos dos tipos de aprovechamientos, también se tienen recintos en los que no se había llegado a actuar en el periodo de dos años establecido (ni hasta la fecha de verificación de los polígonos), estos son los que corresponden a la clasificación "No Realizado".

Las siguientes tablas (Tablas 5 a 7), muestran la distribución de los polígonos por especies clasificadas y por aprovechamientos para cada shape:

Tabla 5. Polígonos de estudio por especie forestal y tipo de aprovechamiento 2014-2016.

APROVECHAMIENTOS POR ESPECIE 2014-2016					
Especie Nivel 2	Clara	Hecho	No Realizado	Total de Polígonos	Superficie Calculada Ha
Haya	0	4	8	12	18,802
Quercus	24	48	61	133	679,353
Frondosas Nobles	2	2	7	11	285,614
Otras Frondosas	12	78	36	126	103,809
Pino Laricio	64	16	31	111	233,891
Pino Silvestre	38	27	74	139	292,422
Pino Carrasco	4	3	1	8	12,387
Otras Coníferas	42	240	117	399	872,541
Total	186	418	335	939	2.498,820

Tabla 6. Polígonos de estudio por especie forestal y tipo de aprovechamiento 2016

APROVECHAMIENTOS POR ESPECIE 2016						
Especie Nivel 2	Clara	Hecho	No Realizado	Sin Información	Total de Polígonos	Superficie Calculada Ha
Haya	47	17	32	-	96	1.028,726
Quercus	23	10	17	5	55	379,271
Otras Frondosas	0	10	4	-	14	23,722
Pino Laricio	39	13	17	-	69	448,842
Pino Silvestre	2	20	30	-	52	143,782
Pino Carrasco	1	0	1	-	2	27,905
Otras Coníferas	62	23	43	7	135	582,381
Total	174	93	144	12	423	2.634,629

Tabla 7. Polígonos de estudio por especie forestal y tipo de aprovechamiento 2017

APROVECHAMIENTOS POR ESPECIE 2017					
Especie Nivel 2	Clara	Hecho	No Realizado	Total de Polígonos	Superficie Calculada Ha
Haya	118	47	11	176	1.572,983
Quercus	19	14	2	35	183,571
Otras Frondosas	0	30	1	31	65,908
Pino Laricio	126	18	8	152	1.022,289
Pino Silvestre	34	17	10	61	155,516
Pino Carrasco	9	16	0	25	279,797
Otras Coníferas	93	18	10	121	373,857
Total	399	160	42	601	3.653,921

En total para los tres periodos, se tenían tan solo 11 recintos de frondosas nobles y 35 recintos de pino carrasco que no eran suficientes para aplicar el test no paramétrico (que se explica en el apartado 4.1.9), por lo tanto, las frondosas nobles se agruparon con Otras Frondosas (para el periodo de 2014-2016) y el pino carrasco con Otras Coníferas (en los tres periodos).

3.3. IMÁGENES SENTINEL-2

Las imágenes satelitales Sentinel-2 que cubren la totalidad del territorio de Navarra, se componen de 4 cuadrículas distribuidas de la siguiente manera:

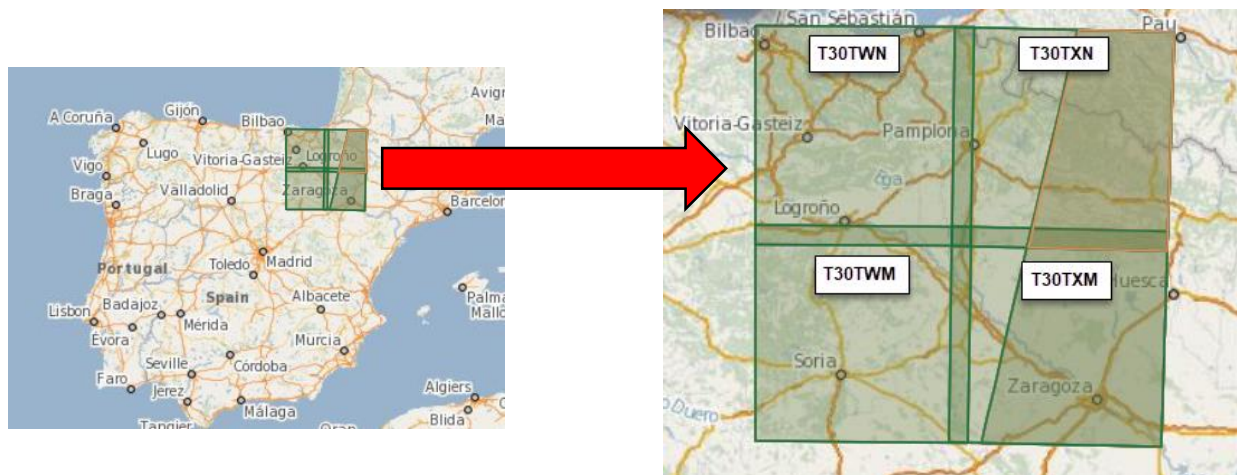


Figura 3. Distribución de imágenes Sentinel-2 de Navarra

Para la realización de este estudio, se emplearon imágenes Sentinel-2 de los años 2016 a 2019, que comprenden el periodo de solicitudes de aprovechamientos mencionadas en la sección anterior. Todas las imágenes se encontraban en nivel 2A, es decir, estaban corregidas atmosféricamente, por lo tanto, ofrecen datos de reflectancia en superficie, idóneos para el cálculo de índices espectrales y la realización de comparativas multitemporales.

Para esta investigación, se optó por trabajar con el compuesto de verano, es decir, con la información de las imágenes adquiridas durante los meses de julio, agosto y septiembre de cada año. En este periodo las especies forestales estudiadas tienen hoja, al trabajar con un compuesto multitemporal se limita la afección de la cobertura nubosa en las imágenes y estudios previos han demostrado una mayor utilidad del compuesto de verano frente a otras estaciones del año para aplicaciones forestales (Bjerreskov et al., 2021).

Las fechas de las imágenes procesadas se resaltan en color amarillo en la siguiente tabla:

Tabla 8. Fechas de imágenes Sentinel-2 procesadas de los años 2016 a 2019

2016																															
JULIO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
AGOSTO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
SEPTIEMBRE	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2017																															
JULIO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
AGOSTO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
SEPTIEMBRE	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	

2018																															
JULIO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
AGOSTO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
SEPTIEMBRE	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2019																															
JULIO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
AGOSTO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
SEPTIEMBRE	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	

El proceso de las imágenes y la generación de los compuestos se realizaron mediante scripts de Python.

4. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo consta de una serie de pasos ejecutados para la obtención de resultados. A continuación, se presenta un esquema general con el proceso realizado y se hace una descripción de los pasos:

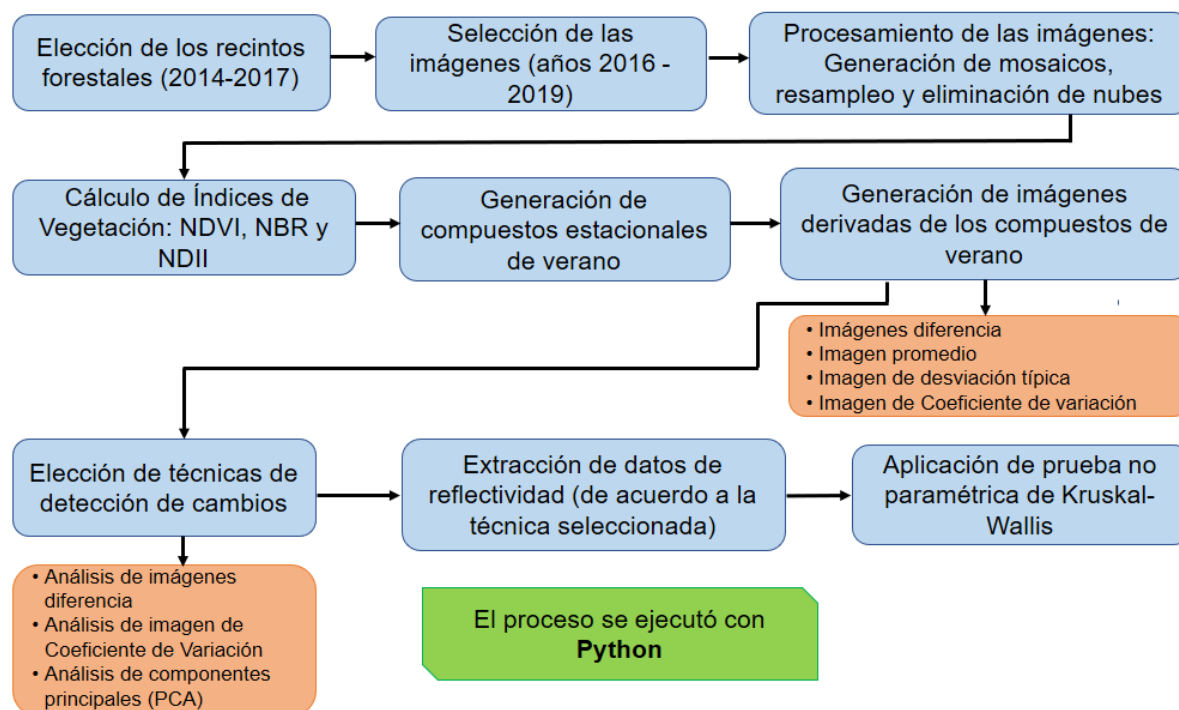


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología utilizada

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

4.1.1. Elección de los recintos forestales

La idea principal, era realizar el análisis con imágenes Sentinel-2 en los mismos recintos (polígonos) que habían sido utilizados en anteriores trabajos realizados por Hervés Blanco (2019) y González Imaz (2021), donde se utilizaron imágenes de Sentinel-1, y adicionalmente en unos polígonos que no habían sido utilizados anteriormente para esta finalidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, Foresna hizo la entrega de la información de partida que corresponde a 1.963 polígonos de aprovechamientos forestales verificados, distribuidos en 3 shapes como se describió en el apartado 3.1.

4.1.2. Selección de las imágenes (años 2016 a 2019)

Se optó por utilizar imágenes Sentinel-2 de los años 2016 a 2019 teniendo en cuenta las fechas de los aprovechamientos forestales proporcionados y el tiempo de ejecución que tiene cada aprovechamiento una vez es autorizado.

4.1.3. Procesamiento de las imágenes

Se realizó el procesamiento para las siguientes bandas de Sentinel-2: B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B11, B12.

En primer lugar, se realiza un mosaico para unir las cuatro cuadrículas (apartado 3.3) que conforman toda la superficie de Navarra. Adicionalmente, en el caso de Sentinel-2 no todas las bandas cuentan con la misma resolución espacial, así que, para facilitar el manejo de la información, se realizó un resamplado para que todas las bandas fueran generadas con una resolución de 10 m. Finalmente, el procesamiento de imágenes también contempló la aplicación de una máscara de nubes, proporcionada por el procesador Sen2Cor, para omitir el análisis de píxeles contaminados por nubes y evitar su influencia en los resultados.

Esta tarea se llevó a cabo mediante un script de Python, que procesa la información aplicando los pasos descritos anteriormente. Se ejecutó para las imágenes de los meses de julio agosto y septiembre de los años seleccionados.

4.1.4. Cálculo de Índices de Vegetación

Una vez se tenían las imágenes procesadas, se realizó el proceso para la obtención de las bandas de índices de vegetación (NDVI, NBR y NDII). Este proceso se llevó a cabo mediante un script de Python que calcula índices normalizados.

4.1.5. Generación de compuestos estacionales de verano

Con las imágenes procesadas, se dio inicio a la fase de generación de los compuestos de verano. Estos se generaron a partir de las imágenes adquiridas en ese periodo, que, en este caso, con el fin de simplificar el cálculo, se tuvieron en cuenta los meses completos de julio, agosto y septiembre.

Como las imágenes ópticas se ven afectadas por la nubosidad, en algunos casos se obtienen imágenes con píxeles sin datos, pudiendo, esta falta de información, generar alteraciones en el cálculo de los compuestos. Es por ello que el cálculo de éstos, se realizó a partir de una media de las imágenes capturadas en la que se tuvo en cuenta, para cada píxel del compuesto final, el número de píxeles con dato disponibles para cada fecha de captura. En este orden de ideas, el compuesto final de verano de cada año, se generó con las siguientes imágenes:

- Imagen sumatoria de valores de reflectancia (Imagen 1)**
Es la sumatoria de todas las imágenes de la misma banda, de los tres meses que componen el verano de cada año. Por ejemplo, para el NDVI de 2017, se suman las bandas del NDVI de julio, la de agosto y la de septiembre de 2017.
- Imagen de píxeles de 1 y 0 (Imagen 2)**
Se genera una imagen de píxeles válidos para cada fecha con valores de 1 y 0, donde, se asigna un 1 al pixel que contiene información en la fecha en cuestión y un 0 al pixel que no tiene dato (por nubes, sombras u otras anomalías).
- Imagen sumatoria del número de píxeles totales (Imagen 3)**
Es una imagen donde cada pixel tendrá el valor correspondiente al número de píxeles con dato que hay en el periodo, es decir, se suman todas las *Imágenes 2* que contengan información de píxeles con dato. Continuando con el ejemplo de la banda del NDVI, se suman las *Imágenes 2* de julio, agosto y septiembre de 2017 de este índice.

Finalmente, se divide la imagen 1 en la imagen 3, y así se obtiene el compuesto estacional de verano para cada una de las bandas y para cada año.

La *Figura 5* muestra el proceso para la generación del compuesto estacional de verano.

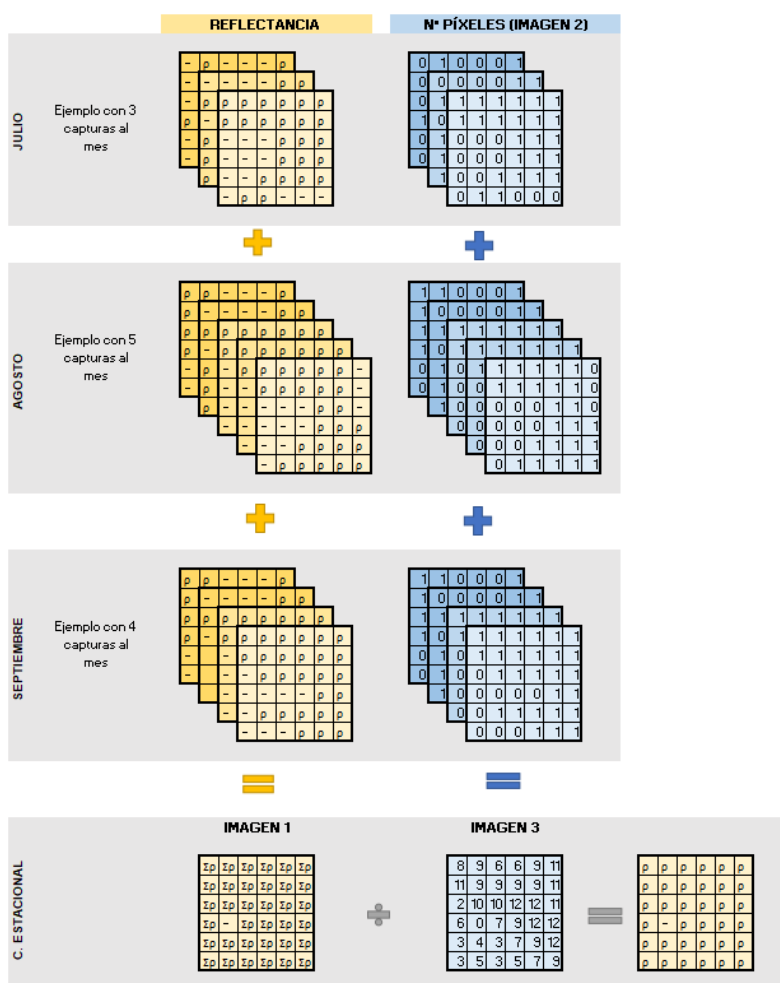


Figura 5. Proceso de generación de compuesto estacional de verano

4.1.6. Imágenes derivadas

A partir de los compuestos de verano de cada año, se obtuvieron otras imágenes que fueron:

- Imágenes diferencia para cada banda (2019-2018, 2019-2017, 2019-2016, 2018-2017, 2018-2016 y 2017-2016).
- Imagen promedio de los 4 compuestos de verano (2016, 2017, 2018 y 2019) para cada banda.
- Imagen de desviación típica de los 4 compuestos de verano (2016, 2017, 2018 y 2019) para cada banda.
- Imagen de Coeficiente de variación para cada banda, calculada como el cociente entre la imagen de desviación típica y la imagen promedio.
- Imágenes de Componentes Principales, donde las imágenes de partida para el Análisis de Componentes Principales fueron 48 imágenes (9 bandas espectrales + 3 índices, por 4 años).

4.1.7. Elección de técnicas de detección de cambio

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizaron tres técnicas de detección de cambios. A continuación, se describen brevemente dichos métodos:

Imágenes Diferencia

Este método consiste en comparar aritméticamente bandas de dos fechas distintas que sean equivalentes radiométricamente, es decir, las mismas bandas del espectro electromagnético. Las zonas estables tendrán valores cercanos a cero, mientras que las zonas que presentan cambios significativos, tendrán valores diferentes de cero marcando la dirección del cambio mediante números positivos o negativos. Es una técnica sencilla que se ha empleado en deforestación y cartografía de especies forestales (Chuvienco, 1998).

Las imágenes diferencia generalmente presentan histogramas con perfil gaussiano (*Figura 6*), con las máximas frecuencias en las zonas próximas al 0 (no cambio) y donde los cambios quedan recogidos en ambas colas del histograma, dependiendo del signo del cambio (González de Audícana, 2016).

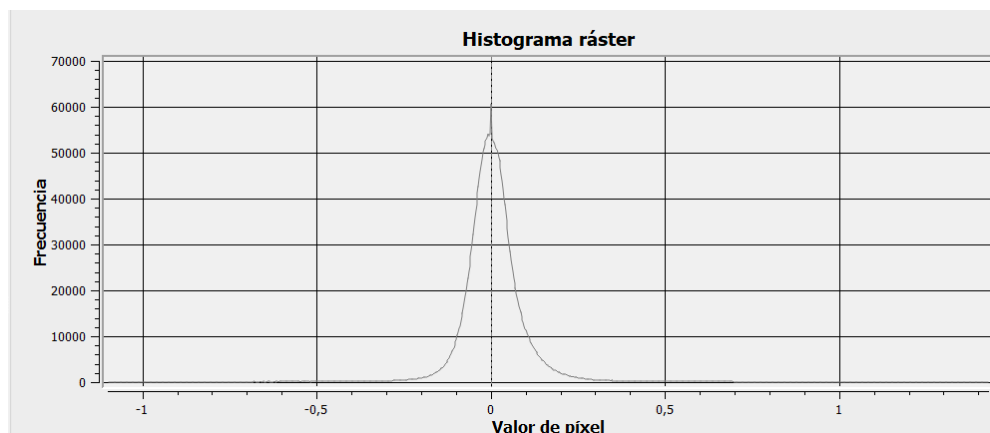


Figura 6. Histograma imagen diferencia NDVI de compuesto de verano 2017-2016

Coefficiente de variación

El coeficiente de variación es un parámetro estadístico que se define como la relación entre la desviación estándar y el valor medio (Arnall et al., 2006). La ecuación matemática (4) para su cálculo es la siguiente:

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{X}|} \quad (4)$$

Donde σ es la desviación estándar y \bar{X} es la media.

El coeficiente de variación muestra la variabilidad de un conjunto de datos, indicando si los valores de una variable están muy alejados del promedio. En este caso, en las zonas estables donde no hay cambio, el CV es bajo y las zonas con un CV alto, indican un cambio, que puede corresponder con un aprovechamiento (Vázquez Porras et al., 2022).

Este parámetro es adecuado para la detección de cambios y sus propiedades estadísticas lo han convertido en un parámetro clave para implementar estrategias de detección de cambios sólidas y extremadamente rápidas (Lu et al., 2004). La imagen CV, se calculó como el cociente de la imagen de desviación estándar y la imagen promedio (de los compuestos de verano de los años 2016, 2017, 2018 y 2019).

Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica estadística que se puede utilizar para transformar un conjunto de bandas de una imagen, de manera que las nuevas bandas (llamadas componentes) no están correlacionadas entre sí y se ordenan en términos de la cantidad de variación de la imagen que explican (Gholamalifard et al., 2013).

Las variables de entrada en un PCA corresponden a las bandas de las imágenes originales, habitualmente correlacionadas entre sí, que representan el 100% de la información de la imagen. Las variables de salida son los Componentes Principales, que son imágenes de igual tamaño que las originales pero independientes entre sí. Se generan tantas Componentes Principales (PC) como bandas de entrada. Generalmente las 3 primeras PC recogen el 95 a 99% de la información de la imagen original de partida.

Respecto a la detección de cambios, este método se utiliza para análisis multitemporales, donde las primeras PC recogen la información en común a todas las fechas y las siguientes PC son aquellas en las que se detectan los cambios (González de Audicana, 2022b).

El procedimiento para el PCA se resume en la siguiente imagen:

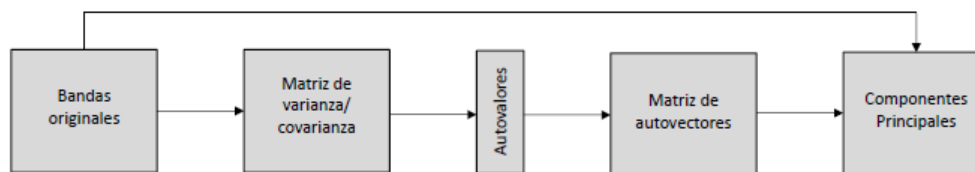


Figura 7. Procedimiento de cálculo de Componentes Principales (González de Audícana, 2022)

Se generó la matriz de varianza/covarianza, posteriormente se generaron los autovalores, cuya suma total indica el 100% de la variabilidad de la imagen y, por lo tanto, puede calcularse el porcentaje de variabilidad de la imagen recogida en cada PC. También se generó la matriz de autovectores para cada PC a partir de la matriz de varianza/covarianza, teniendo en cuenta el valor del autovalor calculado previamente para cada PC. Los autovectores indican la ponderación que se debe aplicar a cada una de las bandas originales para obtener así cada Componente Principal (González de Audícana, 2022b).

4.1.8. Extracción de datos de reflectividad

Una vez se tenían todas las imágenes que serían utilizadas para los análisis, se realizó la extracción de estadísticas zonales, es decir, se calcularon los parámetros estadísticos para cada uno de los polígonos definidos, en base a los datos de las imágenes ráster generadas: las imágenes diferencia, la imagen de Coeficiente de Variación y los Componentes Principales.

En todos los casos, el estadístico calculado para cada polígono fue el valor medio de sus píxeles. Este cálculo se realizó mediante un script de Python.

Una vez se tenían las estadísticas zonales extraídas para cada polígono, se realizó la representación mediante diagramas de cajas agrupando los valores por especie y tipo de aprovechamiento. Esta representación se realizó para todas imágenes analizadas.

4.1.9. Aplicación de la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis

El test de Kruskal Wallis es una prueba no paramétrica basada en el rango que puede utilizarse para corroborar si existen diferencias relevantes a nivel estadístico entre dos o más grupos (Kruskal & Wallis, 1952). Se considera la alternativa no paramétrica al ANOVA unidireccional, para permitir la comparación de grupos independientes, en este caso, los tipos de aprovechamientos (hecho, clara y no realizado).

Al ser no paramétrica, la prueba no asume que los datos provienen de una distribución particular. La prueba de Kruskal Wallis comprueba si existe una diferencia significativa entre los grupos.

Las hipótesis que contrasta este test son las siguientes:

- Hipótesis nula (H_0): Todas las muestras provienen de la misma población (distribución), es decir no hay diferencia entre los grupos
- Hipótesis alternativa (H_A): Al menos una muestra proviene de una población con una distribución distinta, es decir, hay diferencia entre los grupos.

Para realizar esta prueba se ejecutan los siguientes pasos (QuestionPro, 2022):

1. Ordenar todos los valores por rango en orden ascendente en un conjunto combinado.
2. Asigna rangos a los puntos de datos ordenados. Asignar a los valores empatados el rango medio.
3. Suma los diferentes rangos de cada grupo/muestra.
4. Calcular el estadístico H (Ecuación 5):

$$H = \left(\frac{12}{n(n+1)} \sum \frac{T^2}{n_j} \right) - 3(n+1) \quad (5)$$

n= Total de observaciones o participantes
n_j= Total de observaciones o participantes en cada grupo
T²= Sumatoria de los rangos por columna al cuadrado

5. Encontrar el valor crítico de chi-cuadrado, con c-1 grados de libertad.
6. Compara el valor H del Paso 4 con el valor crítico de chi-cuadrado del Paso 5.
Si el valor crítico de chi-cuadrado es menor que el estadístico H, rechaza la hipótesis nula. Si, por el contrario, el valor de chi-cuadrado no es menor que el estadístico H, no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.

Para la aplicación del test de Kruskal-Wallis en este trabajo, se tuvo en cuenta un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de 0.05, donde:

- Un valor $p \leq \alpha$, significa que se rechaza la hipótesis nula y concluye que hay diferencias entre los grupos (se acepta la hipótesis alternativa, por tanto, es significativo).
- Un valor $p > \alpha$, significa que no se cuenta con suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, por tanto, no hay diferencias entre los grupos (no significativo).

En este caso se utilizó esta prueba no paramétrica (ejecutada en Python), ya que es útil cuando se tienen tres o más grupos categóricos independientes o cuando se trabaja con muestras pequeñas en las que se desconoce si es válido suponer la normalidad de los datos (Miniguano, 2016).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se muestran los diagramas de cajas de todas las especies y las bandas de los recintos de 2014-2016, ya que es el periodo que contiene mayor cantidad de polígonos (939 en total). El análisis se realizó para todos los periodos, todas las especies y todas las bandas, pero, con el fin de evitar redundancias, los gráficos de 2016 y 2017 se muestran en anexos.

Posterior a los diagramas de cajas, se encuentran las tablas del test de Kruskal Wallis aplicado a los datos del mismo periodo, para determinar las bandas que presentan información estadísticamente significativa. Finalmente, se encuentra una tabla resumen con la información de los tres periodos y el análisis general de los resultados. Esto se realizó para los tres métodos de detección de cambios investigados.

En el apartado de *Anexos*, se encuentran las gráficas y tablas del test no paramétrico de todas las especies y bandas de los periodos de 2016 y 2017.

5.1. ANÁLISIS DE IMÁGENES DIFERENCIA

Con este método se compararon aritméticamente las mismas bandas del espectro electromagnético de los compuestos de verano de dos años diferentes. De acuerdo a las fechas de autorización cada aprovechamiento y los dos años de plazo que se tienen para su ejecución luego de ser autorizados, se utilizaron las siguientes imágenes:

- **Recintos de 2014-2016:** Se utilizaron las imágenes diferencia de 2018-2016. Para los recintos de este periodo, los aprovechamientos se han podido realizar en algún momento entre 2014 y 2018, sin embargo, al no tener imágenes anteriores a 2016, se utilizaron las imágenes de 2016-2018, ya que las de 2016 son las más cercanas en cuanto a fecha para analizar los aprovechamientos ejecutados desde 2014 y con las de 2018 se podían analizar los ejecutados desde 2016.
- **Recintos de 2016:** Se utilizaron las imágenes diferencia de 2018-2016 ya que con las de 2018 se podían analizar los aprovechamientos ejecutados desde 2016.
- **Recintos de 2017:** Se utilizaron las imágenes diferencia de 2019-2017 ya que con las de 2019 se podían analizar los aprovechamientos ejecutados desde 2017.

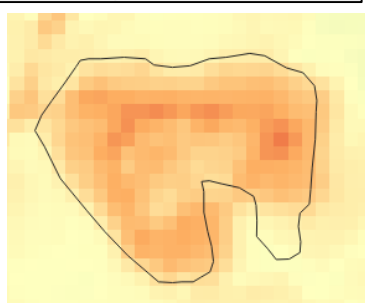
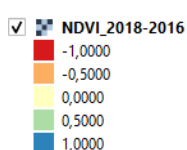
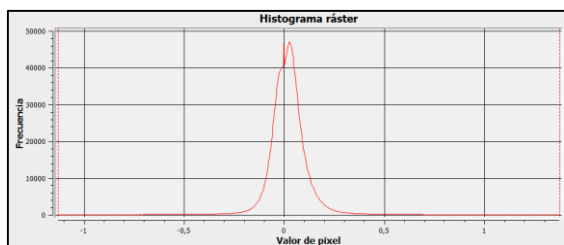
En el caso de las imágenes diferencia, los cambios se identifican de la siguiente forma:

- En las bandas espectrales, de acuerdo al histograma, las zonas que no cambian, deben tener valores de diferencia en torno a 0 y el resto de valores (cambios positivos y negativos) se interpretan según la naturaleza del cambio.
- En los Índices de Vegetación, las zonas sin cambio tomarían valores cercanos a cero. Los valores negativos corresponden a pérdidas de vegetación y los valores positivos del histograma corresponden a recintos con ganancia de vegetación.

En la *Figura 8*, se muestra un ejemplo de un recinto de *Quercus* de 2016 con aprovechamiento de corta a hecho y su variación en el NDVI y en la banda espectral B04, para facilitar la interpretación descrita anteriormente.

Se observa que, en el NDVI, el aprovechamiento se visualiza en color naranja rojizo que correspondería a un valor extremo negativo indicando una pérdida de vegetación, mientras que en la banda B04 se observa en un color amarillo verdoso, que corresponde a un valor positivo extremo que, de igual manera para este caso, indica un incremento de la reflectancia del rojo por pérdida de masa forestal.

Recinto en Índice de Vegetación (NDVI)



Recinto en banda espectral (B04)

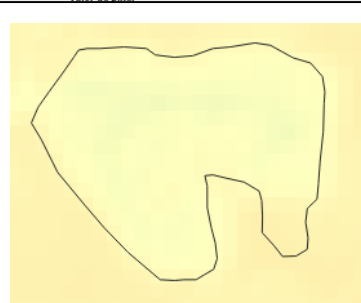
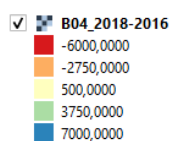
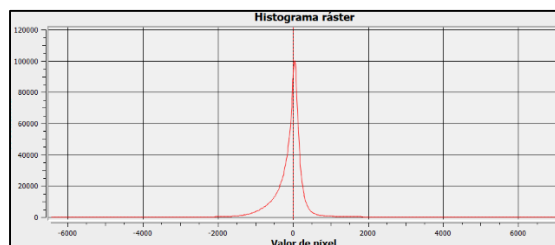
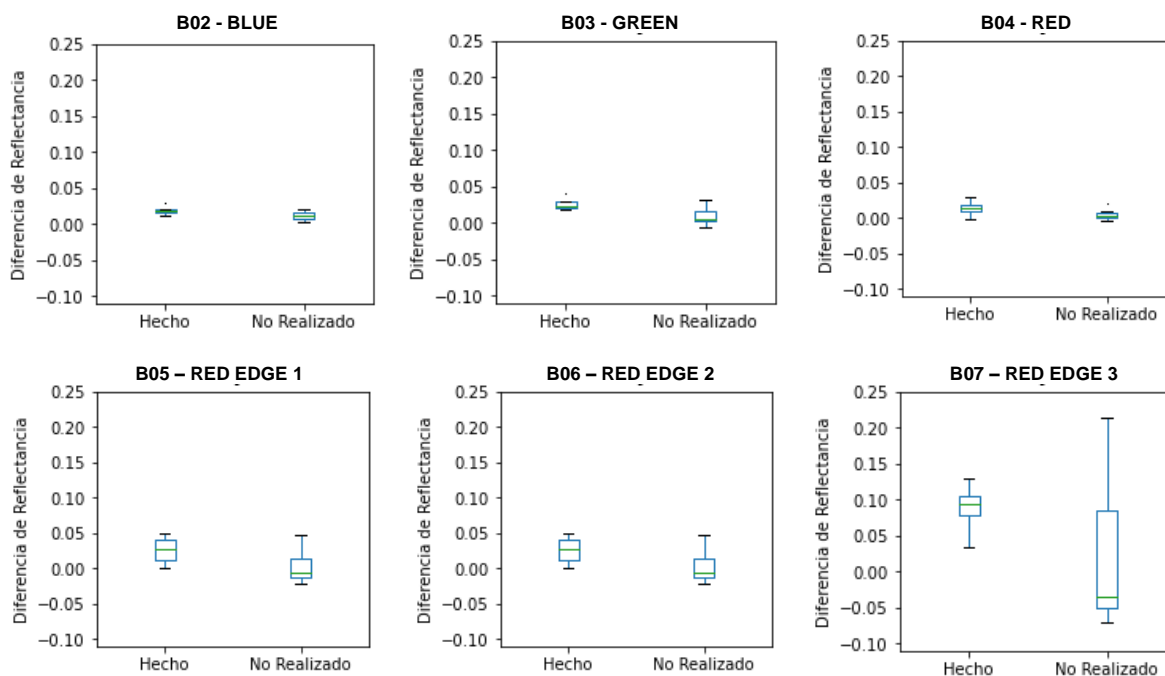


Figura 8. Recinto de Quercus con aprovechamiento de hecho y su variación gráfica en imagen diferencia 2018-2016 en NDVI y en B04

A continuación, se muestran los diagramas de cajas de todas las especies, para el periodo de 2014-2016, de las bandas B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B11, B12, NBR, NDII y NDVI para este método:

5.1.1. HAYA



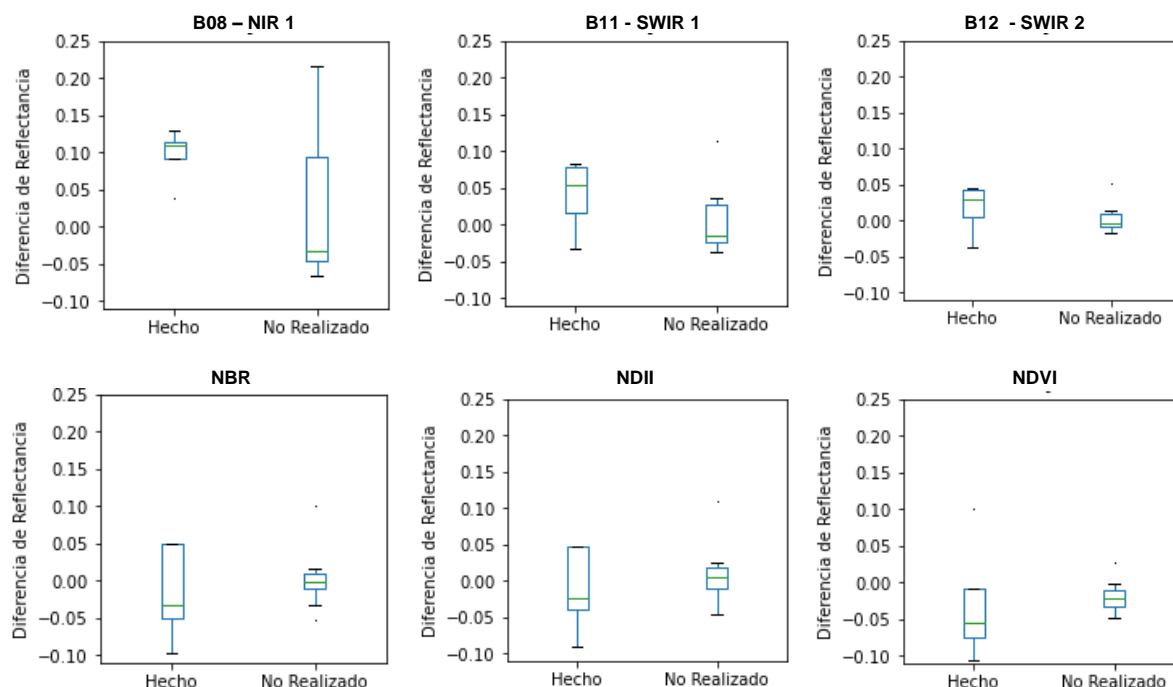


Figura 9. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Haya 2014-2016

Aunque en los recintos de haya, es común realizar claras en mayor proporción que hechos, de acuerdo al informe de análisis de aprovechamientos 2014-2016 realizado por Foresna, para el haya se realizaron cortas (hecho) en este periodo en los polígonos facilitados.

A continuación, se presentan las tablas del test no paramétrico aplicado a los datos del periodo de 2014-2016:

Tabla 9. Resultado test de Kruskal Wallis para el Haya 2014-2016. Método Imágenes Diferencia

HAYA 2014-2016				HAYA 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	1.846	0.174	NO	B08	1.846	0.174	NO
B03	4.154	0.042	SI	B11	0.721	0.396	NO
B04	1.413	0.234	NO	B12	0.721	0.396	NO
B05	2.885	0.089	NO	NBR	0.721	0.396	NO
B06	2.337	0.126	NO	NDII	0.462	0.497	NO
B07	1.846	0.174	NO	NDVI	1.038	0.308	NO

De acuerdo a los diagramas de cajas de las imágenes diferencia, para los recintos de haya del periodo 2014-2016, los hechos presentan mayores diferencias que los recintos no ejecutados, permitiendo identificar cambios (aparentes) en este tipo de aprovechamiento en todas las bandas. Por su parte, los índices de vegetación presentan valores negativos en los hechos, facilitando su identificación. Sin embargo, de acuerdo al test de Kruskal- Wallis en ninguna de bandas (excepto la B03) los resultados son estadísticamente significativos, indicando que a pesar de que gráficamente se evidencia una cierta separación entre aprovechamientos, únicamente la B03 es adecuada para establecer diferencias significativas de recintos de haya para este periodo, aun así, sus valores de diferencia son de los más bajos.

5.1.2. QUERCUS

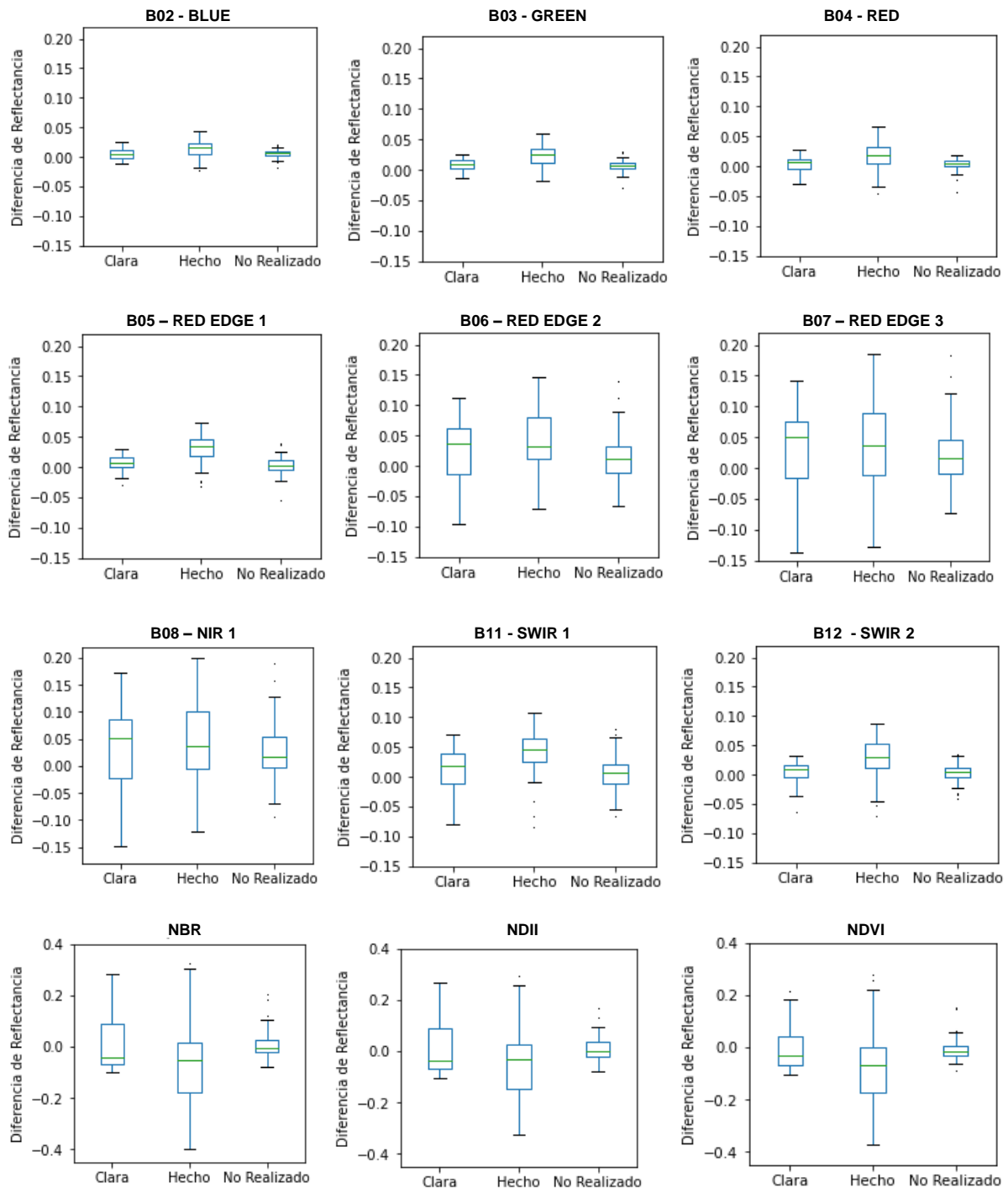


Figura 10. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Quercus 2014-2016

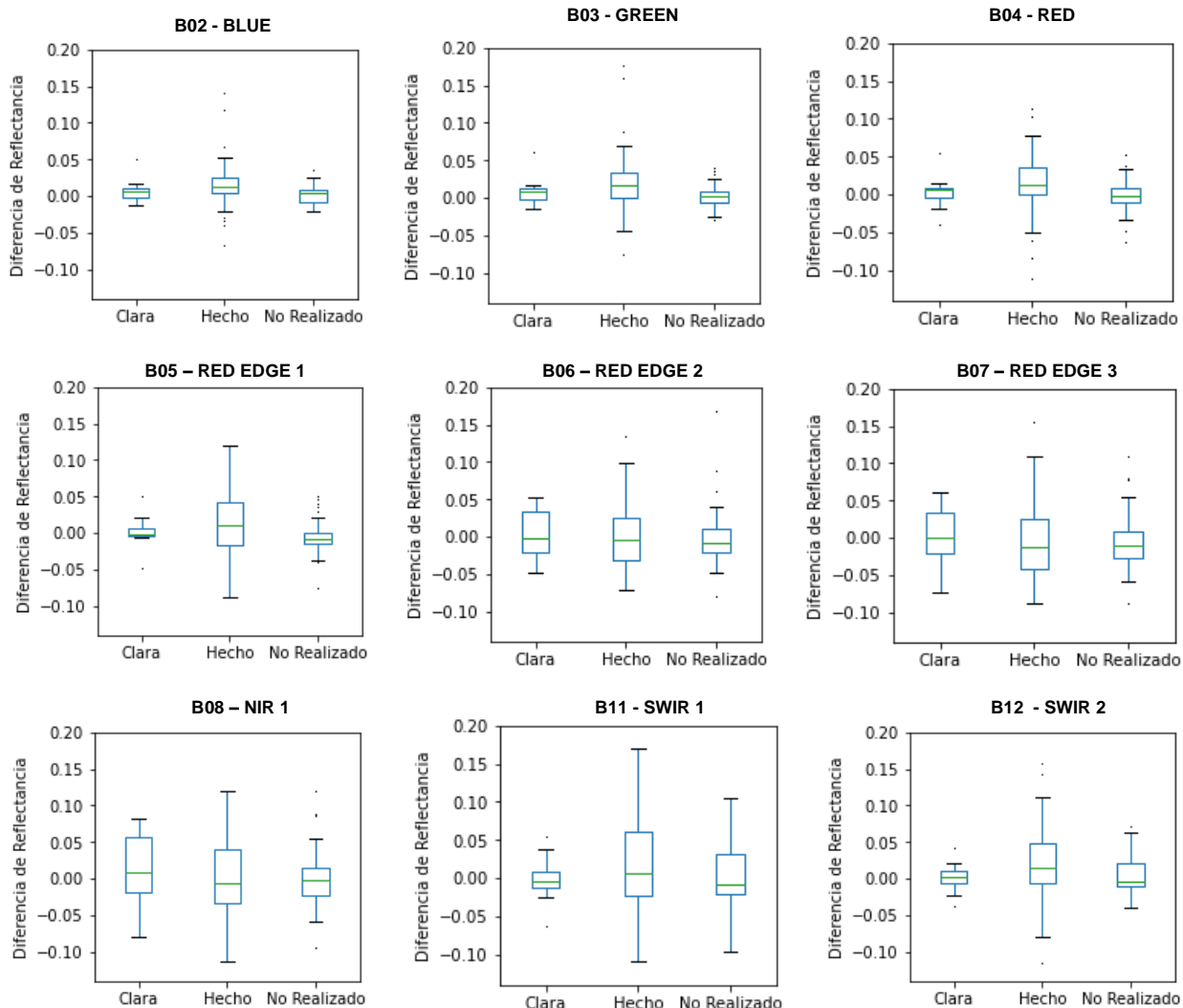
En el caso de los Quercus, en la *Figura 10* se observa que los hechos son los aprovechamientos que se destacan en las bandas de la B03 a la B06 y en las bandas B11 y B12. Sucede de igual manera en los índices de vegetación, donde la separabilidad más notable se presenta en las cortas definitivas. Estos resultados coinciden con la significancia de los datos según el test de Kruskal Wallis (*Tabla 10*), donde las bandas B07 y B08 no son significativas y gráficamente los aprovechamientos evidencian solapes.

Para el Quercus la separabilidad de los hechos respecto a otros aprovechamientos es totalmente identificable para el periodo de 2014-2016.

Tabla 10. Resultado test de Kruskal Wallis para el Quercus 2014-2016. Método Imágenes Diferencia

QUERCUS 2014-2016				QUERCUS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	17.861	0.000	SI	B08	2.047	0.359	NO
B03	33.135	0.000	SI	B11	29.427	0.000	SI
B04	20.343	0.000	SI	B12	29.685	0.000	SI
B05	40.682	0.000	SI	NBR	10.794	0.005	SI
B06	8.749	0.013	SI	NDII	8.714	0.013	SI
B07	2.102	0.350	NO	NDVI	11.950	0.003	SI

5.1.3. OTRAS FRONDOSAS



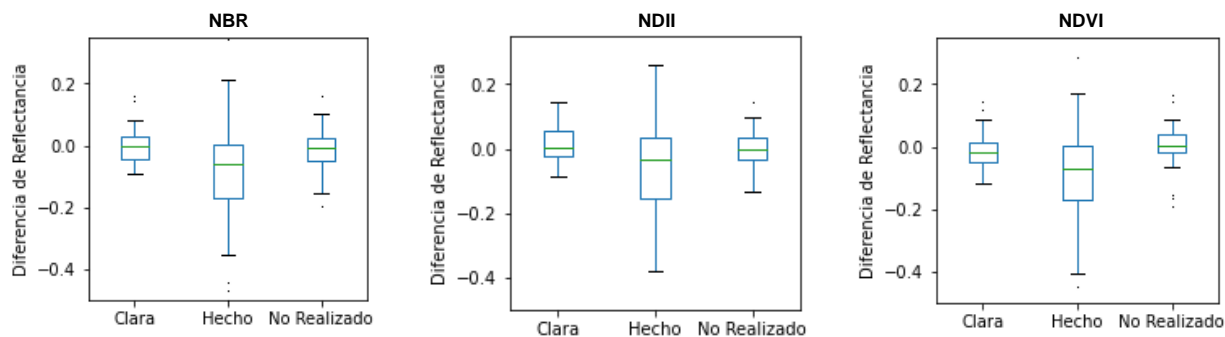


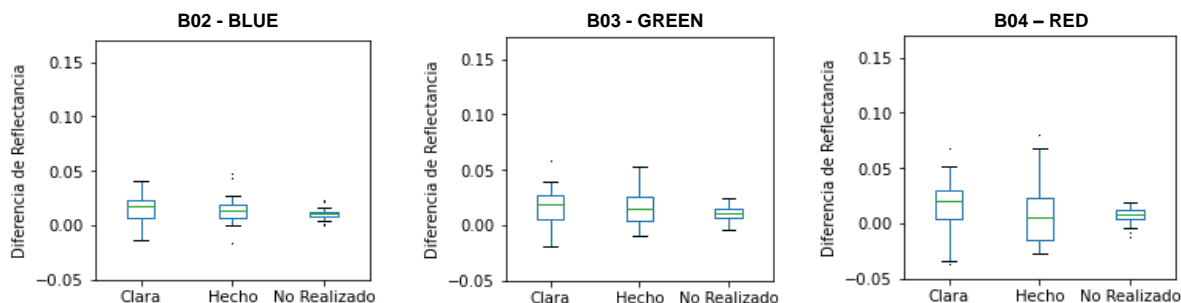
Figura 11. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Otras Frondosas 2014-2016

En el caso de las otras frondosas, las bandas B02, B03, B04 y B05 aportan información significativa, donde los hechos se destacan favorablemente, mientras que las bandas desde la B06 a la B12 evidencian solapes entre las cajas (Figura 11), impidiendo distinguir algún tipo de aprovechamiento. Los índices de vegetación NBR y NDVI son significativos también para los hechos, mientras que el NDII, a pesar de mostrar gráficamente un comportamiento similar a los otros dos índices, no aporta información estadísticamente relevante (Tabla 11).

Tabla 11. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Frondosas 2014-2016. Método Imágenes Diferencia

OTRAS FRONDOSAS 2014-2016				OTRAS FRONDOSAS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	16.984	0.000	SI	B08	1.438	0.487	NO
B03	10.785	0.005	SI	B11	2.030	0.362	NO
B04	14.019	0.001	SI	B12	4.962	0.084	NO
B05	7.384	0.025	SI	NBR	8.721	0.013	SI
B06	0.934	0.627	NO	NDII	5.562	0.062	NO
B07	1.137	0.566	NO	NDVI	16.601	0.000	SI

5.1.4. PINO LARICIO



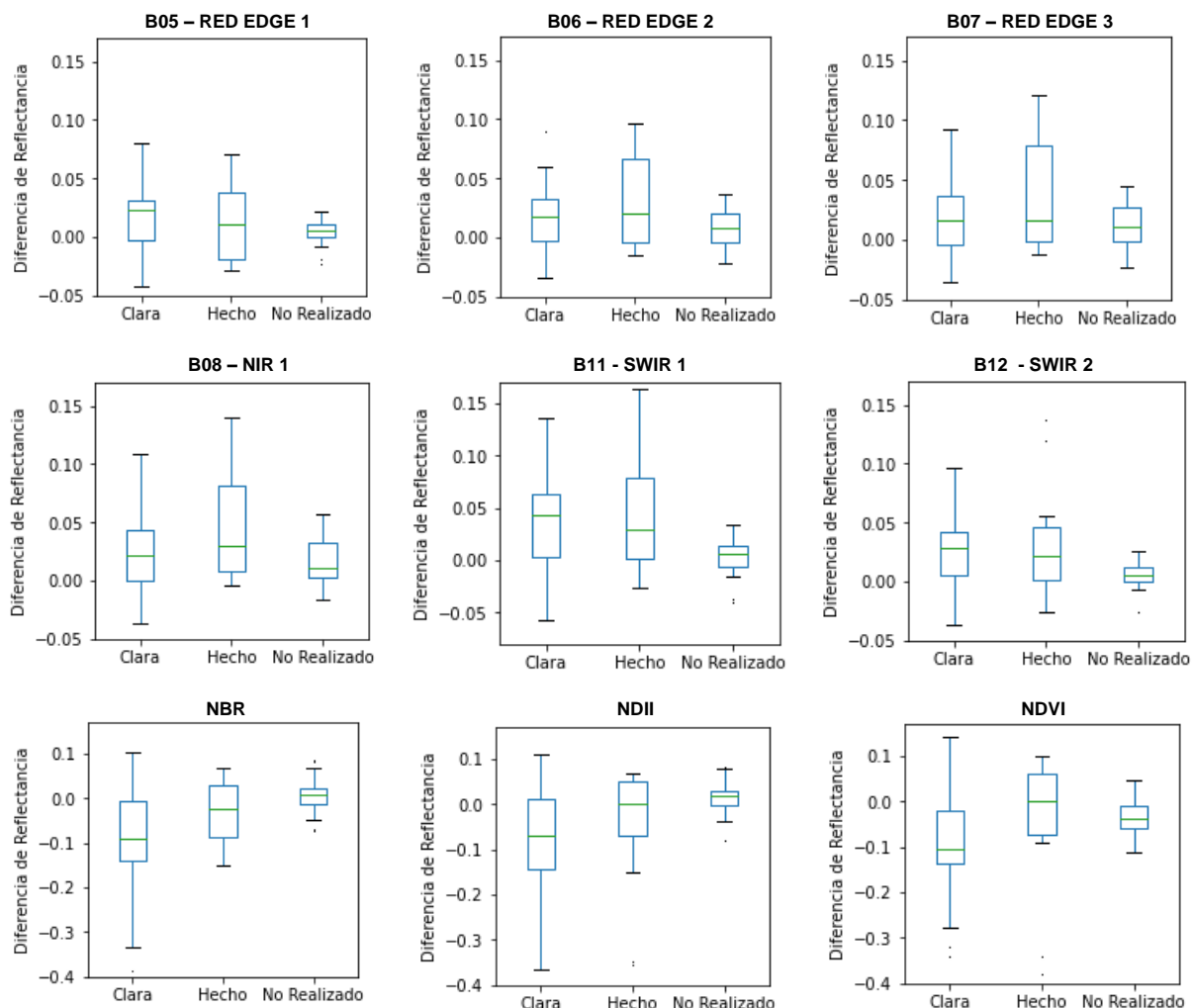


Figura 12. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Pino Laricio 2014-2016

En el pino laricio, las bandas B03, B04 y B11, son significativas. De acuerdo a la *Figura 12*, en estas bandas, el hecho presenta un rango de diferencia más alto que las claras y los no ejecutados. Para el caso de la banda B12 y los tres índices de vegetación (que también son bandas significativas), el aprovechamiento que presenta la mayor separabilidad es la clara, con un mayor rango de variación.

De acuerdo al test de Kruskal Wallis (*Tabla 12*), las bandas B02, B06, B07 y B08 no son estadísticamente significativas.

Tabla 12. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Laricio 2014-2016. Método Imágenes Diferencia

PINO LARICIO 2014-2016				PINO LARICIO 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	5.397	0.067	NO	B08	4.993	0.082	NO
B03	6.094	0.047	SI	B11	13.890	0.001	SI
B04	7.641	0.022	SI	B12	14.851	0.001	SI
B05	7.157	0.028	SI	NBR	17.137	0.000	SI
B06	5.353	0.069	NO	NDII	16.318	0.000	SI
B07	2.906	0.234	NO	NDVI	10.008	0.007	SI

5.1.5. PINO SILVESTRE

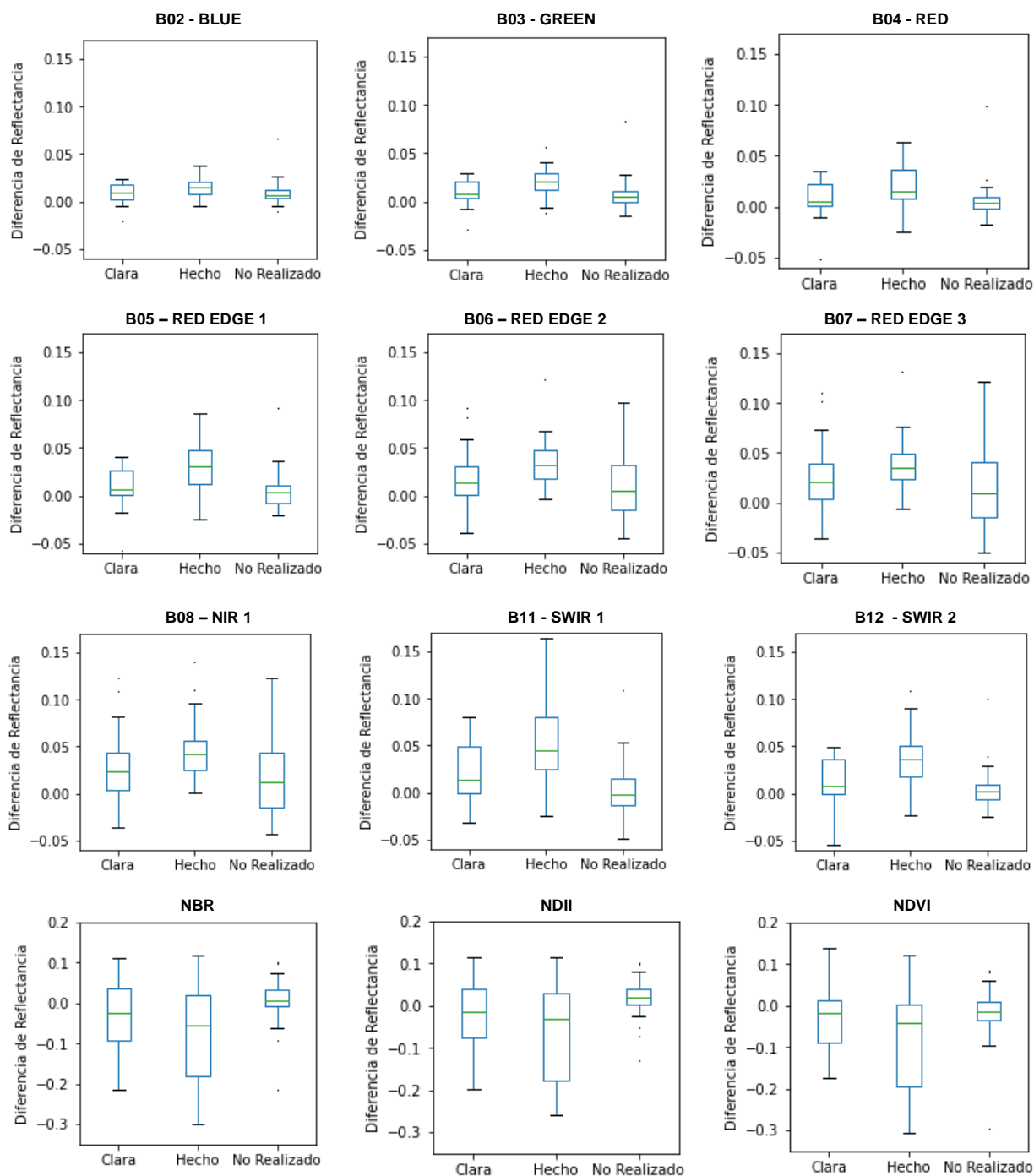


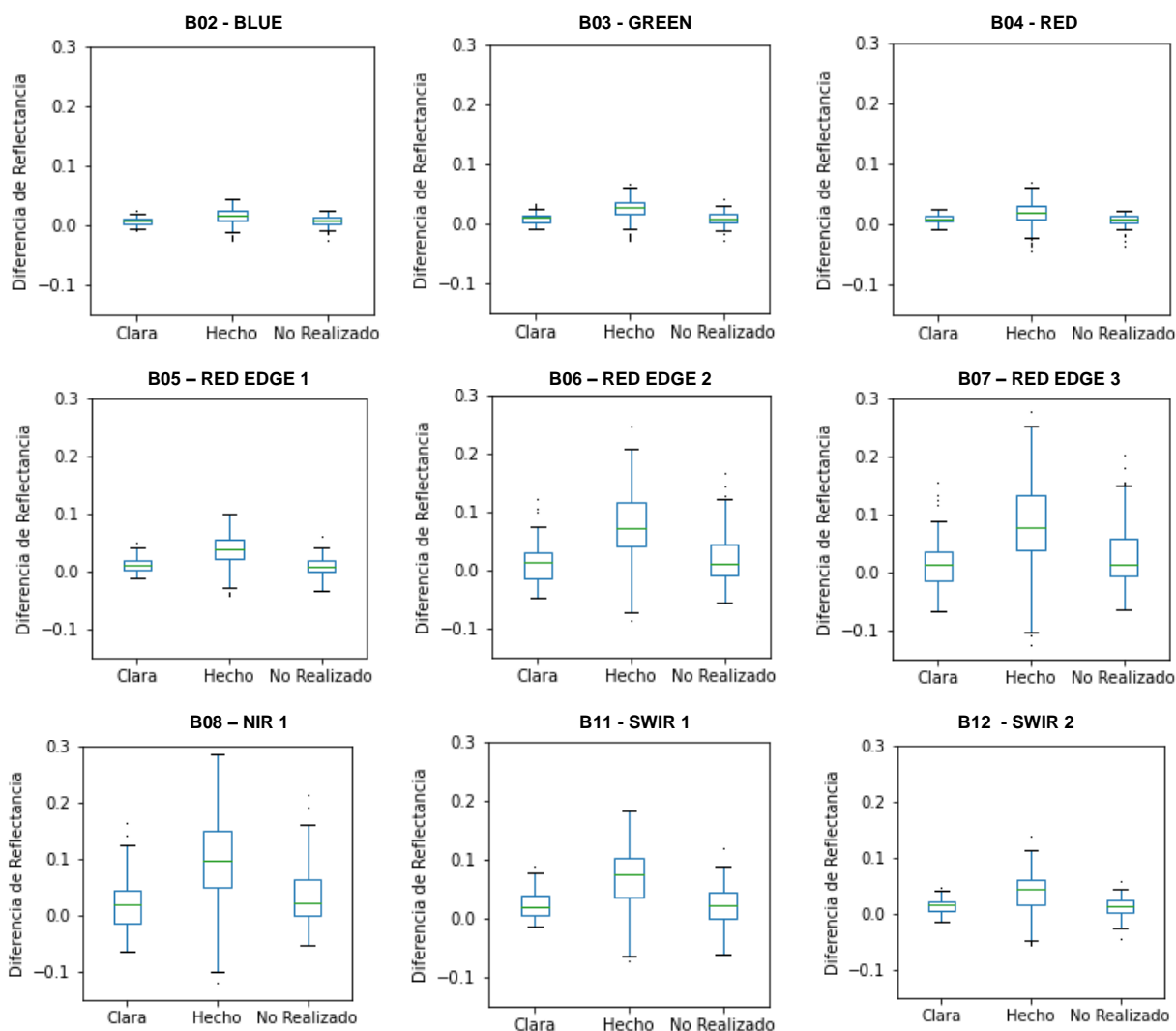
Figura 13. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Pino Silvestre 2014-2016

En el pino silvestre para el periodo de 2014-2016, todas sus bandas resultan ser significativas para la detección de hechos (Tabla 13). De acuerdo a la Figura 13, aunque en las bandas B06, B07 y B08, los recintos que asocian el aprovechamiento No Realizado presentan un mayor rango de variación, también se evidencia que el hecho, presenta menor solape en el rango intercuartil (caja) respecto a las claras y recintos no ejecutados.

Tabla 13. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Silvestre 2014-2016. Método Imágenes Diferencia

PINO SILVESTRE 2014-2016				PINO SILVESTRE 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	10.067	0.007	SI	B08	12.467	0.002	SI
B03	18.887	0.000	SI	B11	29.391	0.000	SI
B04	16.523	0.000	SI	B12	25.620	0.000	SI
B05	22.322	0.000	SI	NBR	11.967	0.003	SI
B06	12.261	0.002	SI	NDII	12.975	0.002	SI
B07	8.824	0.012	SI	NDVI	6.494	0.039	SI

5.1.6. OTRAS CONÍFERAS



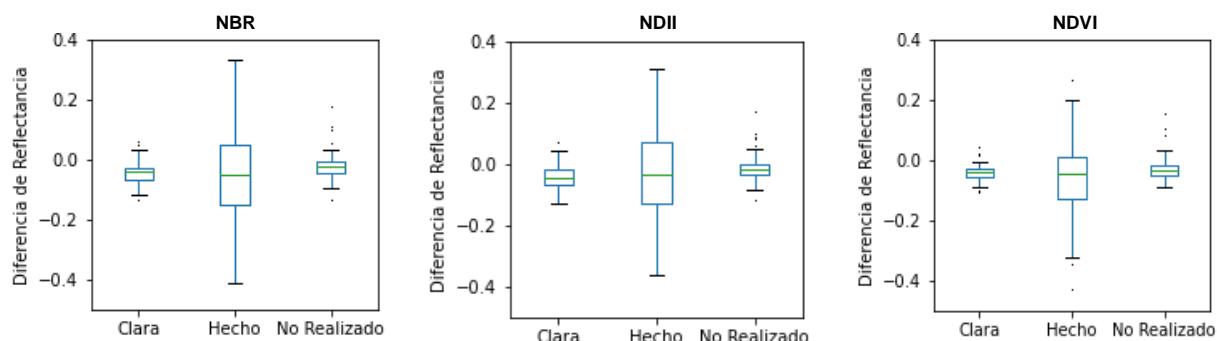


Figura 14. Diagramas de cajas de diferencia de reflectancias para Otras Coníferas 2014-2016

Respecto a las Otras Coníferas las bandas espectrales son significativas para la detección de hechos, pero sucede lo contrario con los índices de vegetación, donde, ninguno de los tres resulta ser significativo (Tabla 14). De acuerdo a la Figura 14, los índices de vegetación presentan un rango de variación mayor en los hechos, pero a pesar de esto, se evidencia un solape entre las cajas, donde la mediana (línea central horizontal de las cajas), está en valores similares para los tres aprovechamientos, impidiendo distinguir alguna diferencia significativa.

Tabla 14. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Coníferas 2014-2016. Método Imágenes Diferencia

OTRAS CONÍFERAS 2014-2016				OTRAS CONÍFERAS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	59.936	0.000	SI	B08	83.846	0.000	SI
B03	105.333	0.000	SI	B11	91.256	0.000	SI
B04	52.879	0.000	SI	B12	79.039	0.000	SI
B05	113.503	0.000	SI	NBR	5.201	0.074	NO
B06	88.733	0.000	SI	NDII	3.686	0.158	NO
B07	73.732	0.000	SI	NDVI	4.731	0.094	NO

Las gráficas y tablas de los periodos 2016 y 2017 se aportan en el Anexo 1. En la Tabla 15 se resumen los resultados obtenidos con este método para todas las especies y bandas, en los tres periodos analizados (2014-2016, 2016 y 2017). Se indica si las diferencias son significativas (recuadros en color verde) o si no lo son (recuadro rojo). Así mismo, se indica el aprovechamiento que se puede identificar en las bandas donde la información es significativa (C: Clara, H: Hecho, NR: No Realizado). La columna denominada “N” corresponde al número de muestras (polígonos) en cada periodo, donde, en las otras frondosas, se suman los polígonos de las frondosas nobles y en las otras coníferas, se suman los recintos del pino carrasco (de acuerdo a la explicación del apartado 3.2). En aquellos recuadros de color verde donde no se indica el aprovechamiento es debido a que, aunque el test de Kruskal-Wallis indica diferencias significativas, en los diagramas de cajas no se aprecia una diferencia clara entre los aprovechamientos que se comparan.

Tabla 15. Resumen de identificación de aprovechamientos por especie y por bandas para el método de Imágenes Diferencia

MÉTODO 1 IMÁGENES DIFERENCIA													
HAYA													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	12		H										
2016	96		H										
2017	176		NR			H	H	H			H	H	H
QUERCUS													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	133	H	H	H	H	H			H	H	H	H	H
2016	55	H	H	H	H	H			H	H	H	H	H
2017	35										H	H	H
OTRAS FRONDOSAS													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	137	H	H	H	H						H		H
2016	14	H	H	H	H						H		H
2017	31	H	H	H	H				H	H	H	H	H
PINO LARICIO													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	111		H	H					H	C	C	C	C
2016	69		H	H	H				H	H	H	H	
2017	152	H	H	H	H	C	C	C	NR	H	C	C	
PINO SILVESTRE													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	139	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2016	52			H					H	H	H	H	H
2017	61	H	H	H	H				H	H	H	H	H
OTRAS CONÍFERAS													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	407	H	H	H	H	H	H	H	H	H			
2016	137		H	H	H	H	H	H	H	H			
2017	146	H	H	H	H	H	H	H	H		H	H	

En la tabla anterior, se observa que, en las imágenes diferencia sobresalen los *hechos* en la mayoría de bandas que muestran diferencias significativas.

Respecto a las bandas espectrales, para el caso del haya, sólo la banda B03 muestra resultados significativos en los tres periodos. En los dos primeros se diferencian las cortas a hecho y en el tercero los no realizados. Respecto al resto de bandas, en el 2017, periodo donde se tienen más muestras (176, respecto a 12 en 2014-2016 y 96 en 2016), se distinguen también los hechos en las bandas del red edge y NIR (B06, B07 y B08) y en los tres índices.

Al contrario, en los Quercus, las bandas B07 y B08 no permiten identificar aprovechamientos en ninguno de los periodos analizados, pero el resto de bandas espectrales muestran diferencias significativas, salvo en 2017 (periodo con un número mínimo de recintos) que no muestra diferencias en ninguna banda. Sin embargo, los índices de vegetación evidencian diferencias significativas para los hechos en los tres periodos, lo que se considera un resultado positivo.

Las otras frondosas por su parte, muestran diferencias significativas para los hechos en todos los periodos en las bandas B02, B03, B04 y B05 y también para los índices NDVI y NBR. Sin embargo, las bandas B06, B07 y B08 no muestran diferencias en ningún periodo. Los resultados en 2017 son mejores que en los otros dos periodos, pero este resultado debe ser interpretado con cautela debido al reducido número de muestras de esta clase en 2017.

Para el pino laricio, las bandas B03, B04, B05, B11 y B12 muestran diferencias para los tres periodos, y también los índices NBR y NDII. En esta especie la clara es el tratamiento más habitual y parece que se puede identificar mediante los índices NBR y NDII (al menos en 2014-2016 y 2017). Sin embargo, en las bandas del visible, son los hechos el tipo de tratamiento que muestra una mejor diferenciación.

El pino silvestre presenta resultados positivos en todos los periodos para las bandas B04, B11 y B12 y para los tres índices. En el periodo de 2014-2016, las diferencias significativas se alcanzan en todas sus bandas, lo que es esperanzador, dado que el número de muestras en este periodo es muy superior a los otros dos, (139 polígonos, mientras que para 2016 y 2017, hay 52 y 61, respectivamente). En todos los casos el tratamiento que mejor se identifica es la corta a hecho.

Por último, la clase otras coníferas muestra también diferencias significativas para los hechos en todas las bandas espectrales, si bien en este caso los índices de vegetación no muestran diferencias tan claras (salvo en 2017).

En general, los índices de vegetación presentan diferencias más notables, entre tratamientos en comparación con las bandas espectrales, mostrando valores negativos que representan disminución de vegetación. El índice que mejor funciona para este método es el NBR, seguido del NDII y finalmente el NDVI.

Una vez analizados todos los periodos y todas las bandas para este primer método, se podría decir que el hecho es el aprovechamiento que más se destaca, siendo el orden de las especies de mayor a menor separabilidad el siguiente: pino silvestre, otras coníferas, quercus, otras frondosas, pino laricio y haya.

5.2. ANÁLISIS DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Este segundo método, mide la variabilidad interanual de los recintos, indicando si los compuestos de verano de los años investigados se asemejan a su valor promedio o por el contrario varían. Para interpretar los resultados de este método, hay que tener en cuenta, que en las zonas donde no hay cambio, el coeficiente será bajo, mientras que, las zonas con un coeficiente de variación alto, indican cambios. Una limitación de este método es que no muestra de forma explícita la dirección del cambio (pérdida vs. ganancia de vegetación).

En la *Figura 15*, se muestra un ejemplo de dos recintos de Pino Laricio de 2014-2016 en el NBR. Se observa que el aprovechamiento tipo hecho se visualiza en color azul verdoso, indicando una variación

alta del coeficiente (valores entre 0,5 y 1), mientras que el recinto sin aprovechamiento, muestra un color amarillo claro, que corresponde a un valor cercano a cero, indicando que no se detecta cambio.

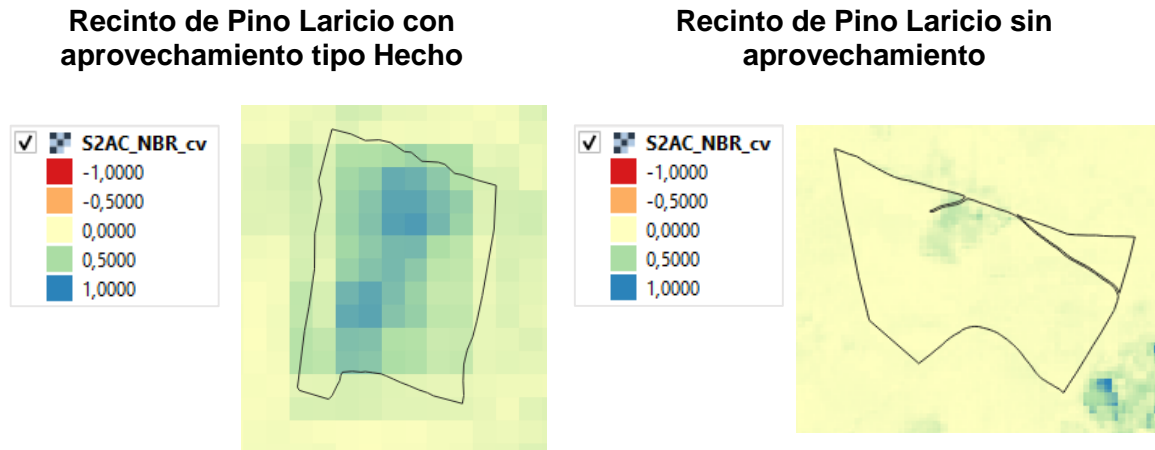
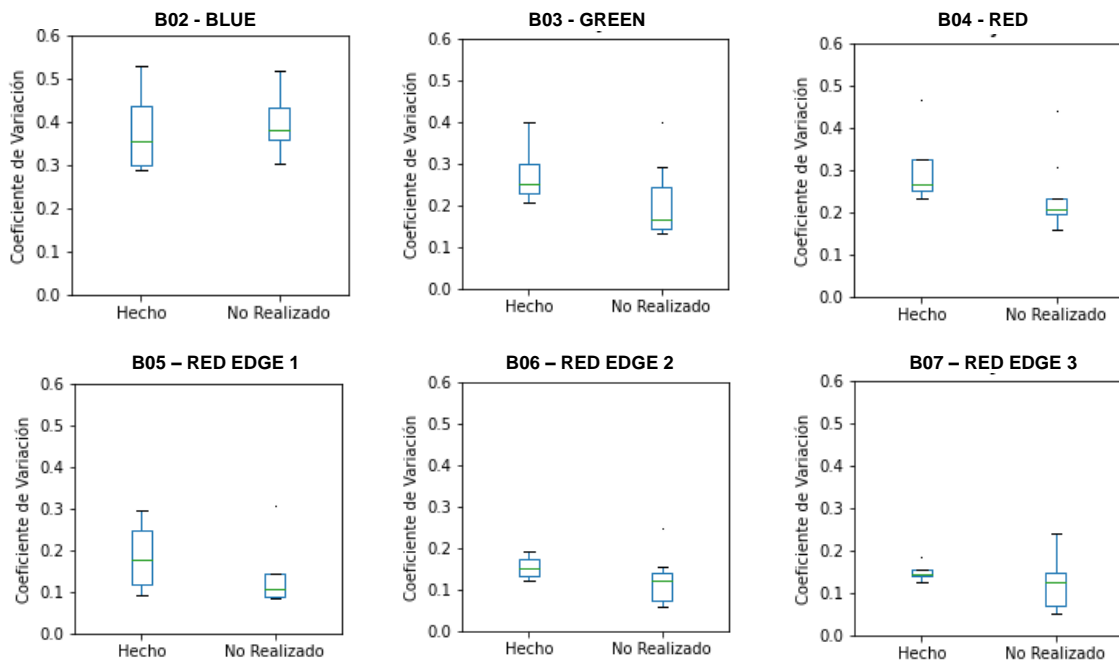


Figura 15. Recinto con aprovechamiento tipo hecho (izq.) vs. recinto sin aprovechamiento (der.) y su representación gráfica de coeficiente de variación en banda NBR.

A continuación, al igual que en el método anterior, se muestran los diagramas de cajas de todas las especies, para el periodo de 2014-2016, de las bandas B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B11, B12, NBR, NDII y NDVI. Los resultados de los otros periodos se aportan en los anexos.

5.2.1. HAYA



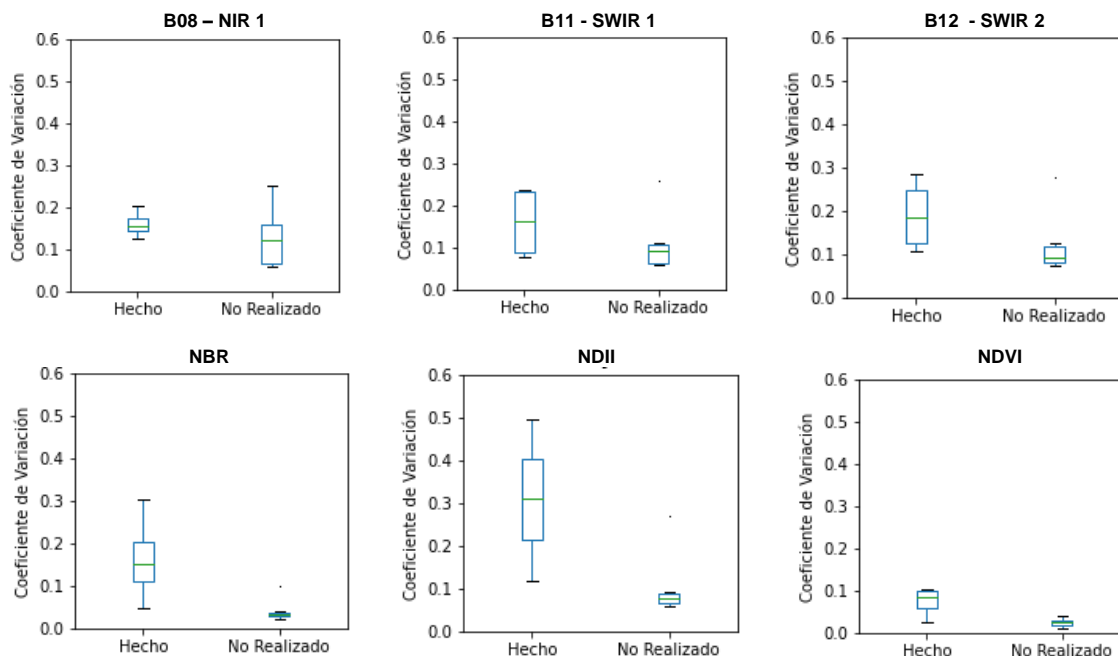


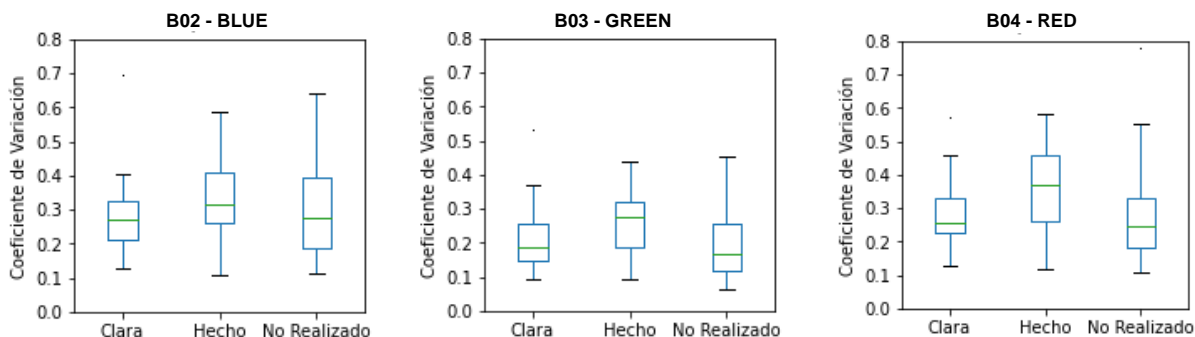
Figura 16. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Haya 2014-2016

Para el periodo de 2014-2016, el haya no presentó datos estadísticamente significativos en ninguna banda espectral (Tabla 16). Por el contrario, los índices de vegetación, resultaron ser significativos. De acuerdo a la Figura 16, el NDII presenta el rango de coeficiente de variación más amplio para las cortas definitivas, seguido del NBR y en menor medida el NDVI.

Tabla 16. Resultado test de Kruskal Wallis para Haya 2014-2016. Método Coeficiente de Variación

HAYA 2014-2016				HAYA 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	0.115	0.734	NO	B08	1.413	0.234	NO
B03	1.846	0.174	NO	B11	0.721	0.396	NO
B04	2.885	0.089	NO	B12	3.490	0.062	NO
B05	1.038	0.308	NO	NBR	6.490	0.011	SI
B06	1.413	0.234	NO	NDII	6.490	0.011	SI
B07	1.413	0.234	NO	NDVI	4.875	0.027	SI

5.2.2. QUERCUS



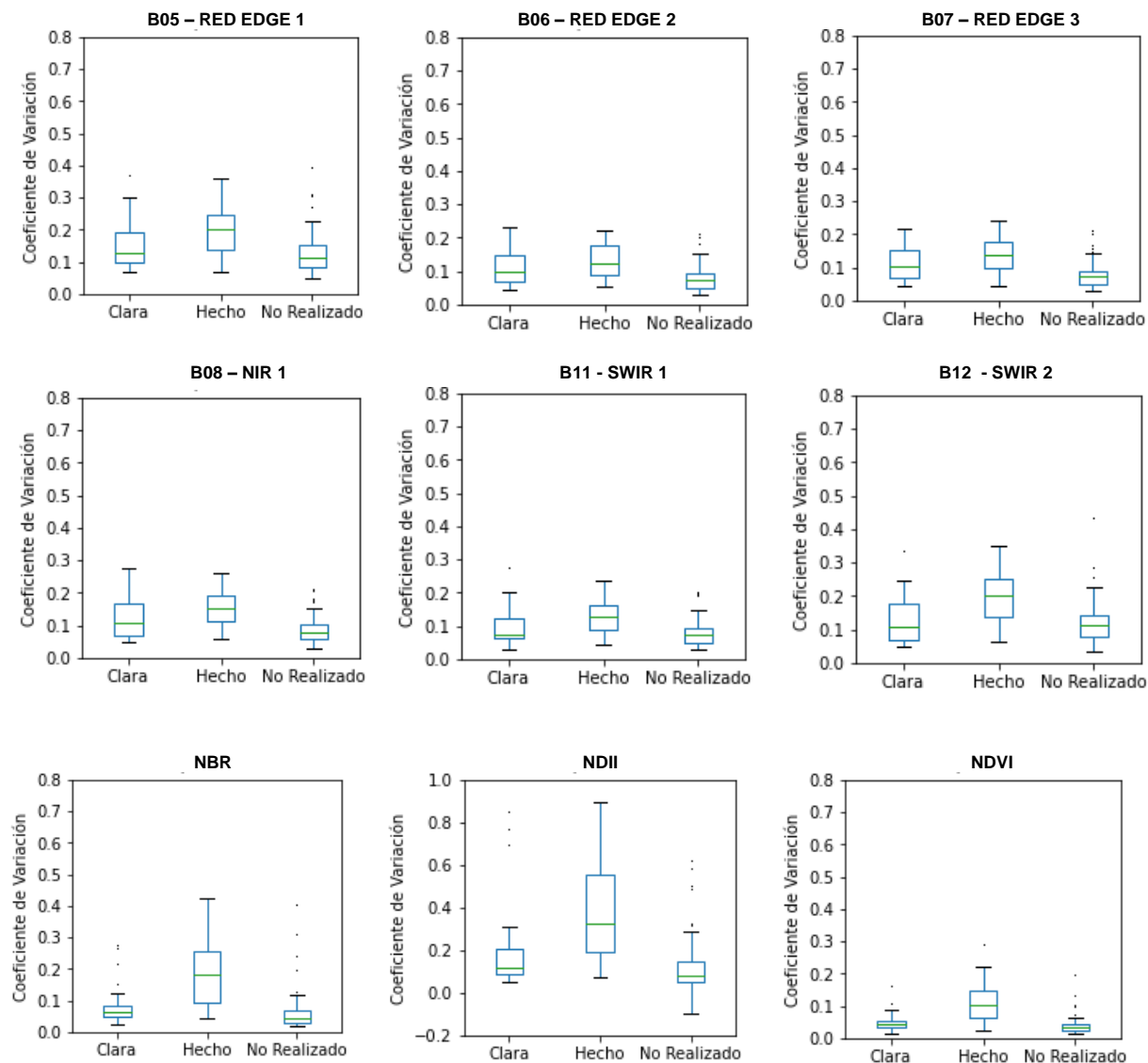


Figura 17. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Quercus 2014-2016

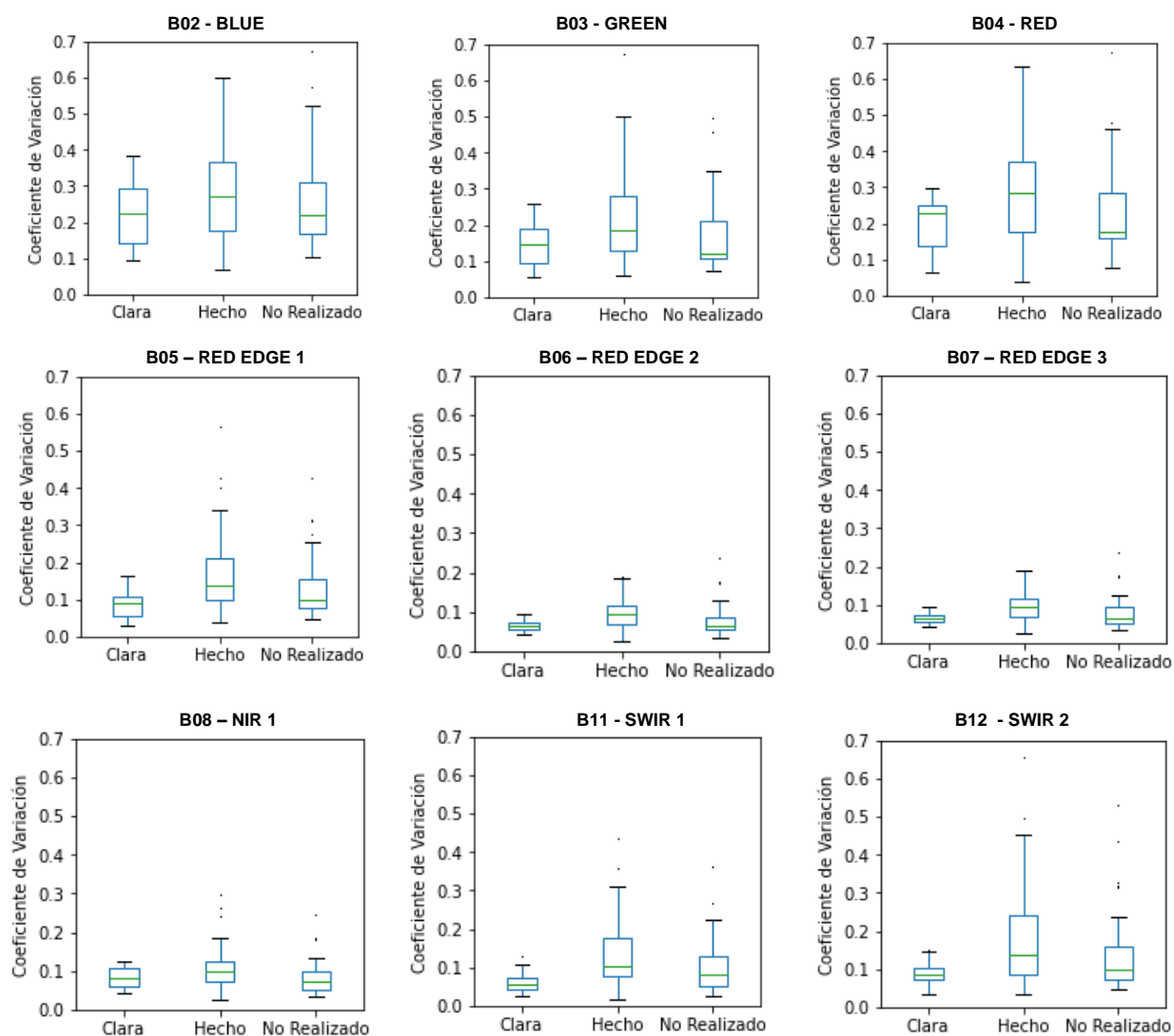
En el caso de los Quercus, en la *Figura 17*, se observa que en las bandas B06, B07, B08 y B11, las *claras* y los *hechos* presentan valores de coeficiente de variación similares, mientras que los recintos no ejecutados presentan un rango de variación menor, que resulta en general más separable respecto a los dos tratamientos. En los índices de vegetación, se aprecia con mayor facilidad que destacan los hechos. Al igual que en el haya, el NDII presenta una mayor variabilidad para el hecho que el NBR y el NDVI (en último lugar), lo que indica que los cambios son más evidentes para los índices que utilizan el SWIR.

De acuerdo al test no paramétrico (*Tabla 17*), todas las bandas son significativas, excepto la B02, en la que se aprecia una alta variabilidad también en los recintos no ejecutados.

Tabla 17. Resultado test de Kruskal Wallis para Quercus 2014-2016. Método Coeficiente de Variación

QUERCUS 2014-2016				QUERCUS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	4.094	0.129	NO	B08	38.600	0.0000	SI
B03	15.396	0.0005	SI	B11	25.084	0.0000	SI
B04	16.636	0.0002	SI	B12	28.316	0.0000	SI
B05	26.506	0.0000	SI	NBR	52.801	0.0000	SI
B06	33.425	0.0000	SI	NDII	46.106	0.0000	SI
B07	34.470	0.0000	SI	NDVI	50.954	0.0000	SI

5.2.3. OTRAS FRONDOSAS



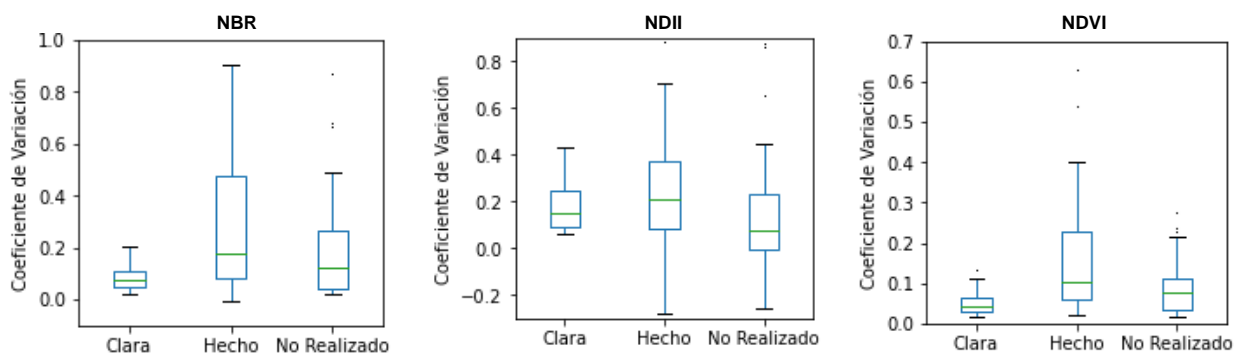


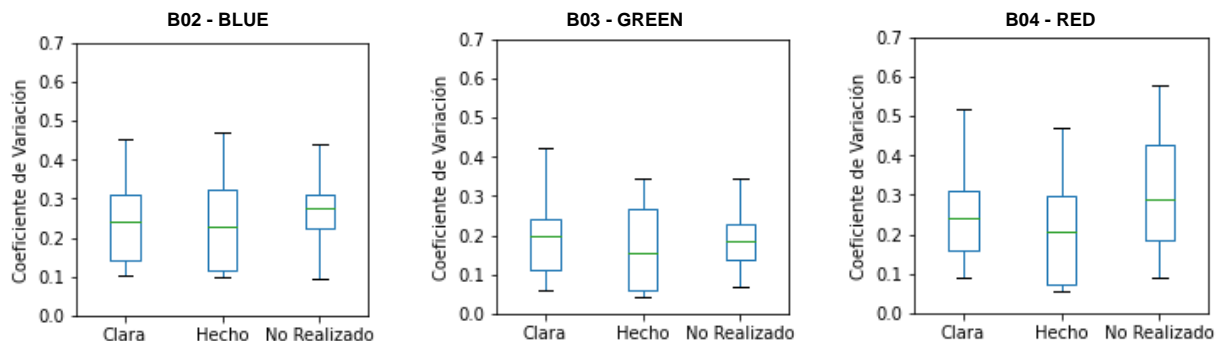
Figura 18. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Otras Frondosas 2014-2016

Para el caso de las otras frondosas, todas las bandas, con excepción de la B02 son significativas para el periodo de 2014-2016 (Tabla 18). El aprovechamiento que presenta la mayor separabilidad es el hecho. Las bandas B02, B03, B04 y B12 evidencian un coeficiente de variación mayor que el resto. En el caso del NBR y el NDII, el hecho presenta el rango de variación más amplio de los tres índices analizados.

Tabla 18. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Frondosas 2014-2016. Método Coeficiente de Variación

OTRAS FRONDOSAS 2014-2016				OTRAS FRONDOSAS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	2.562	0.278	NO	B08	11.748	0.003	SI
B03	6.546	0.038	SI	B11	11.485	0.003	SI
B04	7.255	0.027	SI	B12	7.953	0.019	SI
B05	11.824	0.003	SI	NBR	11.509	0.003	SI
B06	12.021	0.002	SI	NDII	10.837	0.004	SI
B07	13.693	0.001	SI	NDVI	15.538	0.000	SI

5.2.4. PINO LARICIO



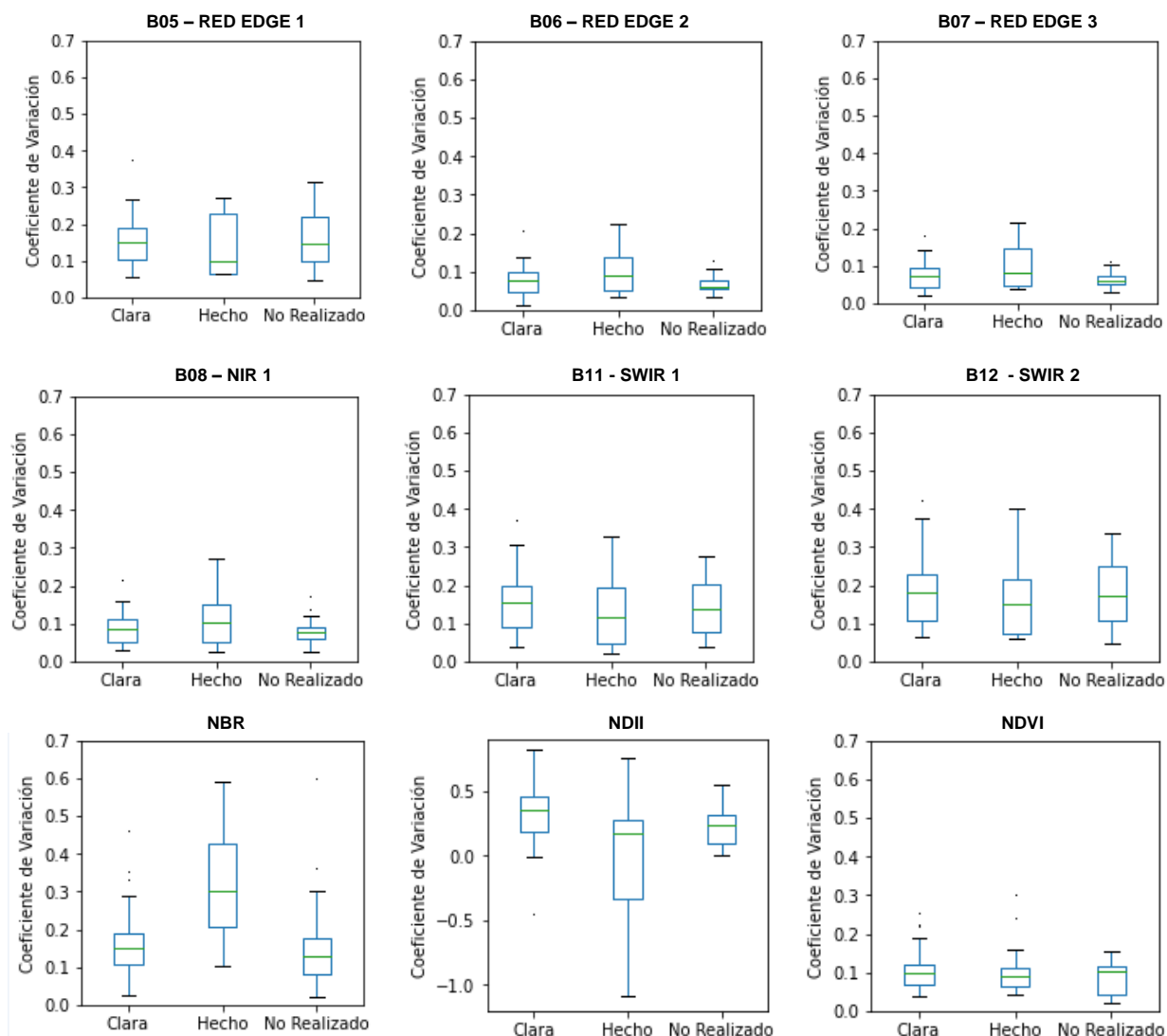


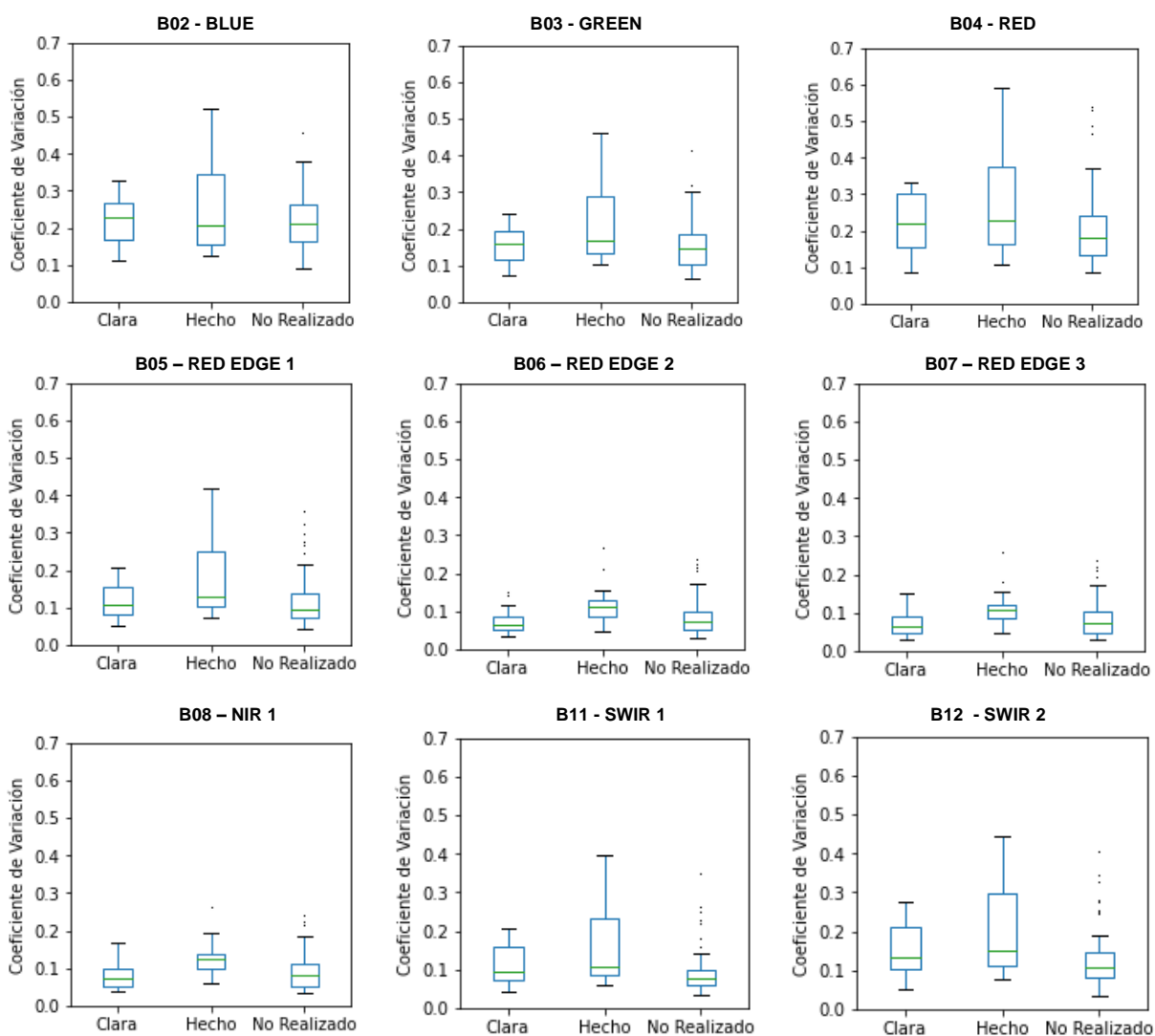
Figura 19. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Pino Laricio 2014-2016

En el caso del pino laricio, de acuerdo a la *Figura 19*, no se evidencian diferencias significativas a nivel gráfico, ya que las cajas se superponen unas con otras en la mayoría de las bandas. Así mismo, el test de Kruskal Wallis (*Tabla 19*), no muestra resultados significativos en ninguna banda, con excepción del NBR, que, muestra un coeficiente de variación más alto para el hecho y sobresale en comparación a las claras y los recintos no aprovechados. Esto indica que el NBR es una de las bandas que mejor representa los cambios detectados con la imagen de Coeficiente de variación en el pino laricio en este periodo.

Tabla 19. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Laricio 2014-2016. Método Coeficiente de Variación

PINO LARICIO 2014-2016				PINO LARICIO 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	1.526	0.466	NO	B08	1.794	0.408	NO
B03	1.016	0.602	NO	B11	1.424	0.491	NO
B04	5.910	0.052	NO	B12	0.822	0.663	NO
B05	1.084	0.582	NO	NBR	19.249	0.000	SI
B06	2.531	0.282	NO	NDII	4.126	0.127	NO
B07	2.541	0.281	NO	NDVI	1.411	0.494	NO

5.2.5. PINO SILVESTRE



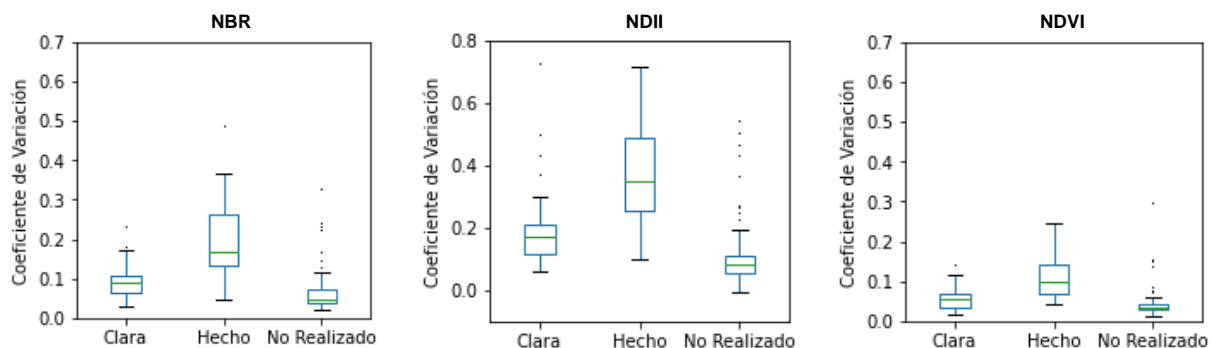


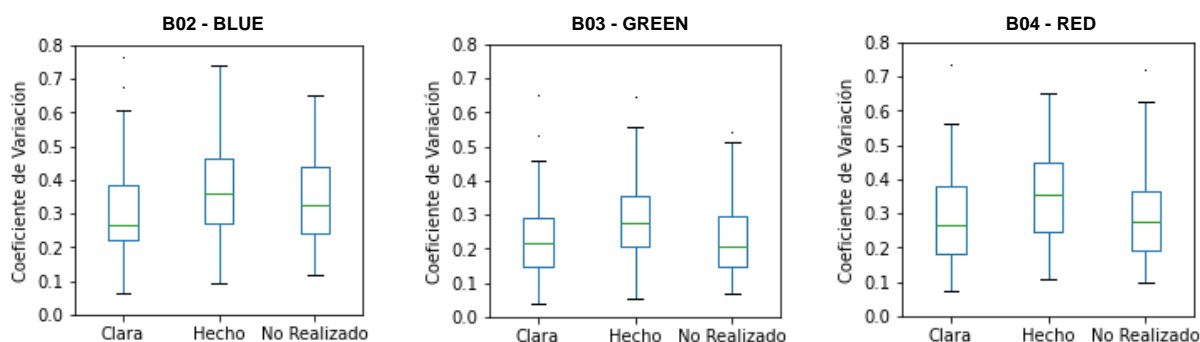
Figura 20. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Pino Silvestre 2014-2016

El pino silvestre presentó resultados favorables en todas las bandas analizadas del periodo 2014-2016, menos en la B02 (Tabla 20), de la misma manera que ocurría con las otras coníferas. En todas las bandas, la corta a hecho presentó los valores de coeficiente de variación más altos. El NDII, evidencia la mayor separabilidad, ya que en este índice el rango de variación del coeficiente es el más amplio de todas las bandas en general.

Tabla 20. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Silvestre 2014-2016. Método Coeficiente de Variación

PINO SILVESTRE 2014-2016				PINO SILVESTRE 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo	Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	0.647	0.724	NO	B08	20.291	0.000	SI
B03	7.231	0.027	SI	B11	17.581	0.000	SI
B04	6.779	0.034	SI	B12	14.396	0.001	SI
B05	13.243	0.001	SI	NBR	52.937	0.000	SI
B06	18.681	0.000	SI	NDII	59.308	0.000	SI
B07	17.507	0.000	SI	NDVI	46.952	0.000	SI

5.2.6. OTRAS CONÍFERAS



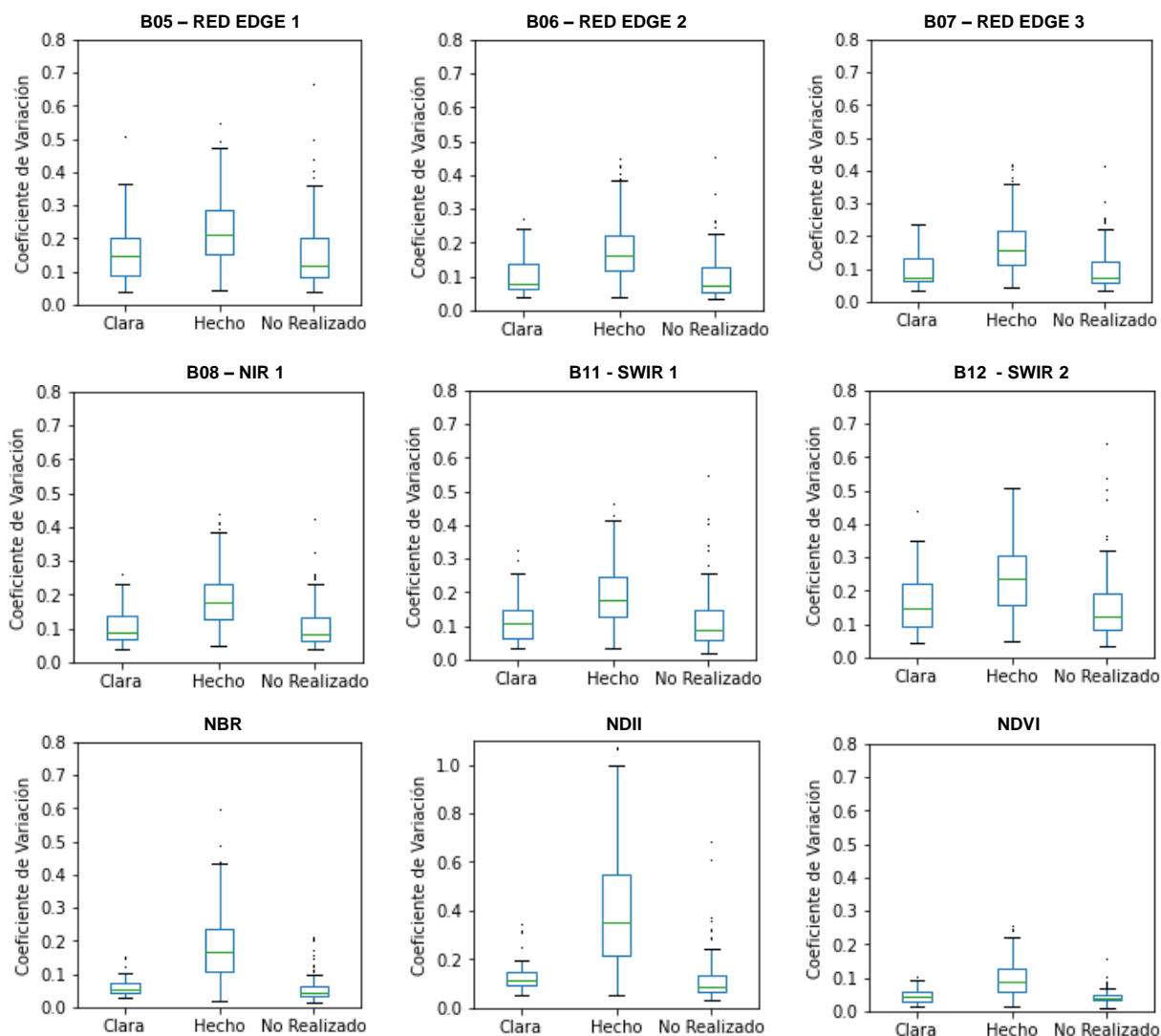


Figura 21. Diagramas de cajas de Coeficiente de Variación para Otras Coníferas 2014-2016

En el caso de otras coníferas, todas las bandas son significativas según el test no paramétrico aplicado (Tabla 21). El hecho presenta una mayor variabilidad que la clara y los No Realizados, sin embargo, en algunos casos se observa cierto solapamiento entre las cajas, como es el caso de las bandas B02, B03 y B04 (Figura 21). En el caso del NDVI se observa que el hecho presenta un mayor coeficiente de variación, pero estas diferencias son menores que en las demás bandas, indicando que se evidencian los cambios en menor medida.

Tabla 21. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Coníferas 2014-2016. Método Coeficiente de Variación

OTRAS CONÍFERAS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	14.399	0.001	SI
B03	30.839	0.000	SI
B04	23.084	0.000	SI
B05	48.839	0.000	SI
B06	98.913	0.000	SI
B07	99.206	0.000	SI

OTRAS CONÍFERAS 2014-2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B08	111.740	0.000	SI
B11	72.016	0.000	SI
B12	66.182	0.000	SI
NBR	176.811	0.000	SI
NDII	187.225	0.000	SI
NDVI	136.525	0.000	SI

En la siguiente tabla se resume la información de todas las especies y todas las bandas para este método y se indica si las diferencias son significativas (recuadros en color verde) o si no lo son (recuadro rojo). En caso de ser estadísticamente significativas, se indica cual es el aprovechamiento que presenta la mayor separabilidad (C: Clara, H: Hecho, NR: No Realizado). La columna denominada “N” corresponde al número de muestras (polígonos) en cada periodo, donde, en las otras frondosas, se suman los polígonos de las frondosas nobles y en las otras coníferas, se suman los recintos del pino carrasco (de acuerdo a la explicación del apartado 3.2). En aquellos recuadros de color verde donde no se indica el aprovechamiento es debido a que, aunque el test de Kruskal-Wallis indica diferencias significativas, en los diagramas de cajas no se aprecia claramente qué aprovechamiento es el diferente.

Tabla 22. Resumen de identificación de aprovechamientos por especie y por banda para el método de Coeficiente de Variación

MÉTODO 2 COEFICIENTE DE VARIACIÓN													
HAYA													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	12										H	H	H
2016	96	C									C	H	
2017	176										H	H	H
QUERCUS													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	133		H	H	H	NR	NR	NR	NR	H	H	H	H
2016	55		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2017	35			H	H					H	H	H	H
OTRAS FRONDOSAS													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	137		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2016	14									H			H
2017	31	H	H	H	H				H	H	H	H	H
PINO LARICIO													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	111										H		
2016	69		NR	NR	NR	H	H	H	NR	NR	H	H	H
2017	152		H	H	H	H	H	H	NR	H			
PINO SILVESTRE													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	139		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2016	52		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2017	61	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
OTRAS CONÍFERAS													
PERIODO	N	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B11	B12	NBR	NDII	NDVI
2014-2016	407				H	H	H	H	H	H	H	H	H
2016	137								H	H	H	H	H
2017	146		NR	H	H	NR	NR	NR	H	H	H		H

De acuerdo a la *Tabla 22*, el aprovechamiento que presenta la mayor separabilidad de manera general es el hecho, aunque, existen algunas bandas de los tres periodos, donde las claras y los hechos presentan un rango de variabilidad similar que no permite distinguirlos, es por ello que los recintos no ejecutados son los que se pueden diferenciar. Así mismo, en el caso de la clase otras coníferas, principalmente en los periodos de 2014-2016 y 2016, a pesar de que el test identifica diferencias significativas, no se puede distinguir claramente en los diagramas de cajas el tratamiento separable, ya que los tres tienen rangos de variación similar y muestran solape entre sus cajas.

Una vez se analizaron los resultados, se evidencia que para el haya, ninguna de las bandas espectrales resulta ser significativa en ninguno de los tres periodos, sin embargo, los tres índices mostraron diferencias significativas, principalmente para las cortas a hecho.

El *Quercus* muestra resultados positivos para periodos de 2014-2016 y 2016 en todas las bandas e índices, (excepto la B02). En el periodo 2017 los resultados son algo peores, pero, como ya se ha comentado en el método anterior, en este periodo el número de muestras es muy reducido. Una vez más el hecho es el tratamiento que más destaca en general.

Para el caso de otras frondosas, el periodo de 2014-2016 (el que cuenta con más datos), muestra resultados muy positivos para las cortas definitivas, ya que los datos son estadísticamente significativos en todas las bandas, nuevamente excepto la B02. En los otros dos periodos estudiados, los resultados no fueron tan positivos, si bien el número de muestras estudiado fue también mucho menor (*Tabla 22*)

En el pino laricio, el periodo 2014-2016 mostró resultados pobres a pesar de tener un número elevado de muestras (111 frente a las 152 de 2017 y 69 de 2016). En los otros dos periodos se observaron diferencias significativas para el resto de bandas espectrales, en particular para los hechos. Respecto a los índices de vegetación el NBR mostró resultados significativos para todos los periodos.

El pino silvestre presenta resultados favorables en todas las bandas espectrales e índices, salvo la banda B02, siendo esta especie la que presenta la mayor cantidad de bandas con diferencias significativas. Nuevamente el tratamiento que mostraba diferencias fue la corta a hecho.

Por último, las otras coníferas, presentan resultados también positivos, similares al pino silvestre, salvo para la banda B02. No obstante, es necesario comentar que para las bandas del visible e incluso las del red edge en 2016, se observan solapes en los diagramas de cajas y no se puede distinguir fácilmente qué aprovechamiento es el que presenta diferencias.

Es digno de mención el resultado obtenido por el NBR en este método, que evidencia la mayor significancia para los tres periodos para separar hechos principalmente.

Esta variación del NBR que muestra resultados positivos globalmente, es evidente, ya que, se pasa de tener una cubierta arbolada, a tener un suelo desnudo o vegetación herbácea o arbustiva espontánea. Estos cambios no se detectan tan fácilmente en el NDII y el NDVI.

En general para el método 2, el orden de las especies de mayor a menor separabilidad detectada es el siguiente: pino silvestre, *quercus*, otras frondosas, otras coníferas, pino laricio y haya.

5.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Para el análisis de componentes principales, la información de partida fue una imagen con 48 bandas, correspondiente a las bandas B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B11, B12, NDVI, NBR y NDII de los compuestos de verano de cada año (2016, 2017, 2018 y 2019). A continuación, se presenta la tabla de autovalores y el análisis de la matriz de autovectores para cada Componente Principal (PC).

▪ Tabla de autovalores

A partir de la matriz de varianza/covarianza se calcularon los autovalores. La suma total de estos, indica el 100% de la información de la imagen, por lo tanto, se calcula el porcentaje de información que está recogido en cada Componente Principal. Con el fin de identificar las Componentes que representen zonas de cambio, se escogen las PC que no recojan la información en común. Es decir, a partir de la PC03 en este caso.

Tabla 23. Autovalores de Análisis de Componentes Principales

PC	AutoValor	Porcentaje de Autovalor	Porcentaje de AutoValor Acumulado	PC	AutoValor	Porcentaje de Autovalor	Porcentaje de AutoValor Acumulado
01	1.52E+07	68.516	68.516	25	2.92E+03	0.013	99.942
02	4.29E+06	19.275	87.791	26	2.60E+03	0.012	99.953
03	7.59E+05	3.415	91.206	27	2.48E+03	0.011	99.964
04	4.13E+05	1.858	93.064	28	1.89E+03	0.009	99.973
05	3.76E+05	1.691	94.755	29	1.44E+03	0.007	99.979
06	3.31E+05	1.490	96.245	30	1.40E+03	0.006	99.986
07	2.20E+05	0.988	97.233	31	8.72E+02	0.004	99.990
08	1.59E+05	0.714	97.947	32	6.63E+02	0.003	99.993
09	1.45E+05	0.654	98.600	33	6.45E+02	0.003	99.995
10	7.62E+04	0.343	98.943	34	4.30E+02	0.002	99.997
11	4.59E+04	0.207	99.149	35	3.03E+02	0.001	99.999
12	3.90E+04	0.176	99.325	36	2.84E+02	0.001	100.000
13	3.06E+04	0.138	99.462	37	3.91E-02	0.000	100.000
14	2.13E+04	0.096	99.558	38	4.84E-03	0.000	100.000
15	1.71E+04	0.077	99.635	39	2.70E-03	0.000	100.000
16	1.60E+04	0.072	99.707	40	1.33E-03	0.000	100.000
17	1.08E+04	0.049	99.756	41	1.08E-03	0.000	100.000
18	8.36E+03	0.038	99.794	42	5.07E-04	0.000	100.000
19	6.14E+03	0.028	99.821	43	2.40E-04	0.000	100.000
20	5.91E+03	0.027	99.848	44	2.19E-04	0.000	100.000
21	5.36E+03	0.024	99.872	45	1.91E-04	0.000	100.000
22	4.58E+03	0.021	99.893	46	4.33E-05	0.000	100.000
23	4.43E+03	0.020	99.913	47	2.59E-05	0.000	100.000
24	3.54E+03	0.016	99.928	48	2.17E-05	0.000	100.000

La *Tabla 23* muestra que en las primeras componentes se encuentra la mayoría de la información. El 99,7% de información se encuentra repartido en las primeras 16 componentes. La Componente 1 presenta la mayoría de información con un 68,5%. La segunda Componente presenta un 19,28% y a partir de la tercera Componente disminuye notablemente a un 3,42%. A partir de la Componente 17, el porcentaje de variación es inferior al 0,05%, por lo tanto, no fueron analizadas.

La *Figura 22*, representa gráficamente la información de la *Tabla 23*, donde se muestra el porcentaje de varianza individual que recoge cada componente (desde la PC01 hasta la PC16) y la varianza acumulada.

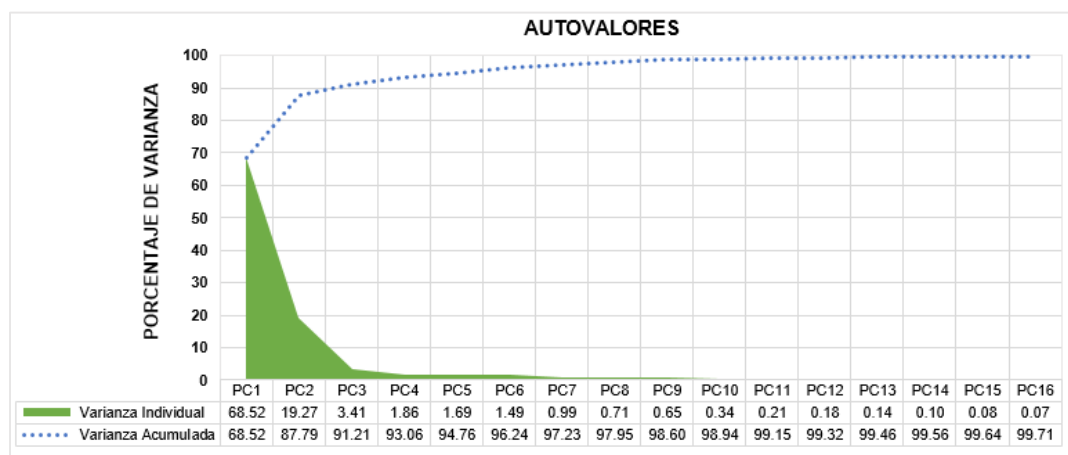


Figura 22. Porcentaje de varianza individual y acumulada de la PC1 a la PC16

▪ **Tabla de autovectores**

Para realizar el análisis de la matriz de autovectores (*Anexo 3.5*), se generó en Python un gráfico de tipo *heatmap* (mapa de calor), a partir de dicha matriz, que representa la influencia de las variables (bandas originales) en cada componente (desde la PC01 hasta la PC16).

La *Figura 23* representa en el eje X, las 48 bandas utilizadas para el PCA y en el eje Y, se encuentran las primeras 16 Componentes Principales. La escala de color indica que, el valor extremo amarillo es una alta correlación positiva de las bandas originales con las Componentes. El valor extremo azul oscuro, representa una alta correlación negativa.

Los números dentro de cada uno de los recuadros de la imagen, representan el peso asignado (ponderación), que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener cada PC, por ejemplo, para la PC02, la banda NBR de 2018, tiene una ponderación de 0.56, la banda del NDII de 2018 tiene una ponderación de -0.13 y la banda del NDVI del mismo año, tiene un valor de 0.23 para esta Componente, es decir que, cada PC es el resultado de la combinación lineal de todas las bandas originales. Un valor de cero significa que la banda original no tiene influencia en la PC.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la *Figura 23* se observa que, las Componentes Principales de la 01 a la 09, y de la 13 a la 16, tienen una baja influencia (valores cercanos a cero), de las bandas del compuesto de verano de 2019. Del mismo modo, las Componentes 10, 11 y 12, presentan una correlación baja con las bandas de los compuestos de verano de los años 2016, 2017 y 2018.

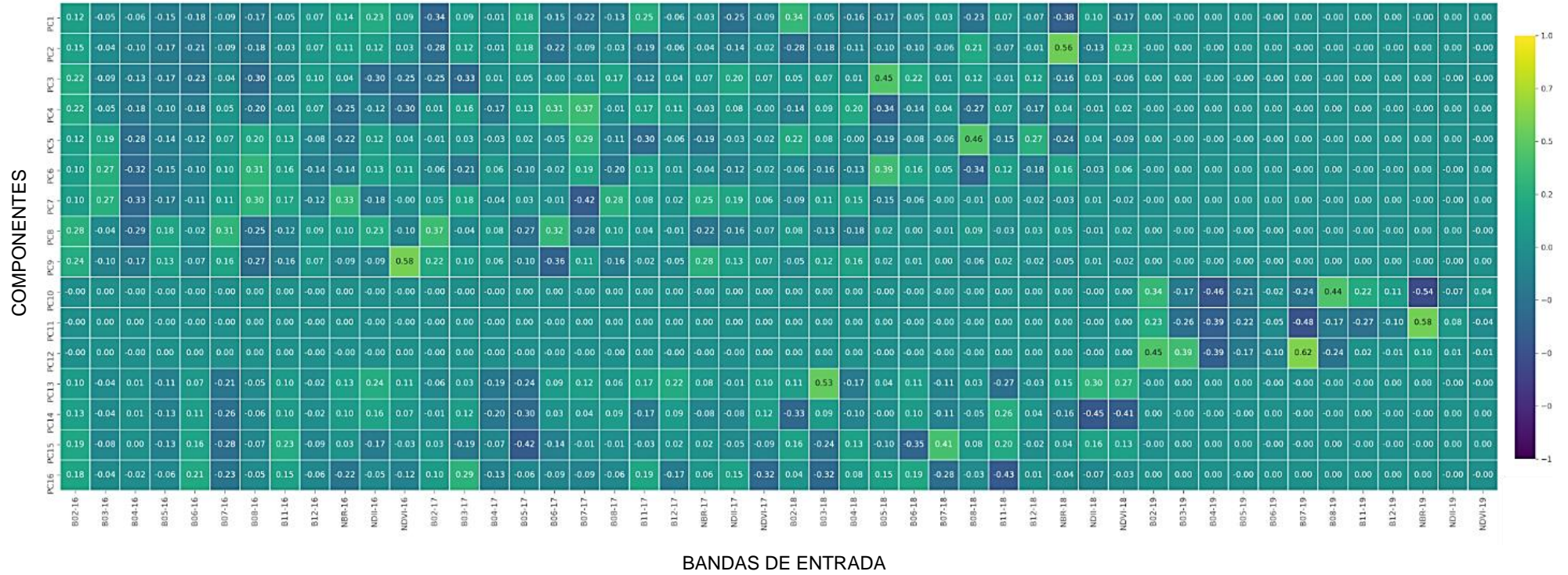
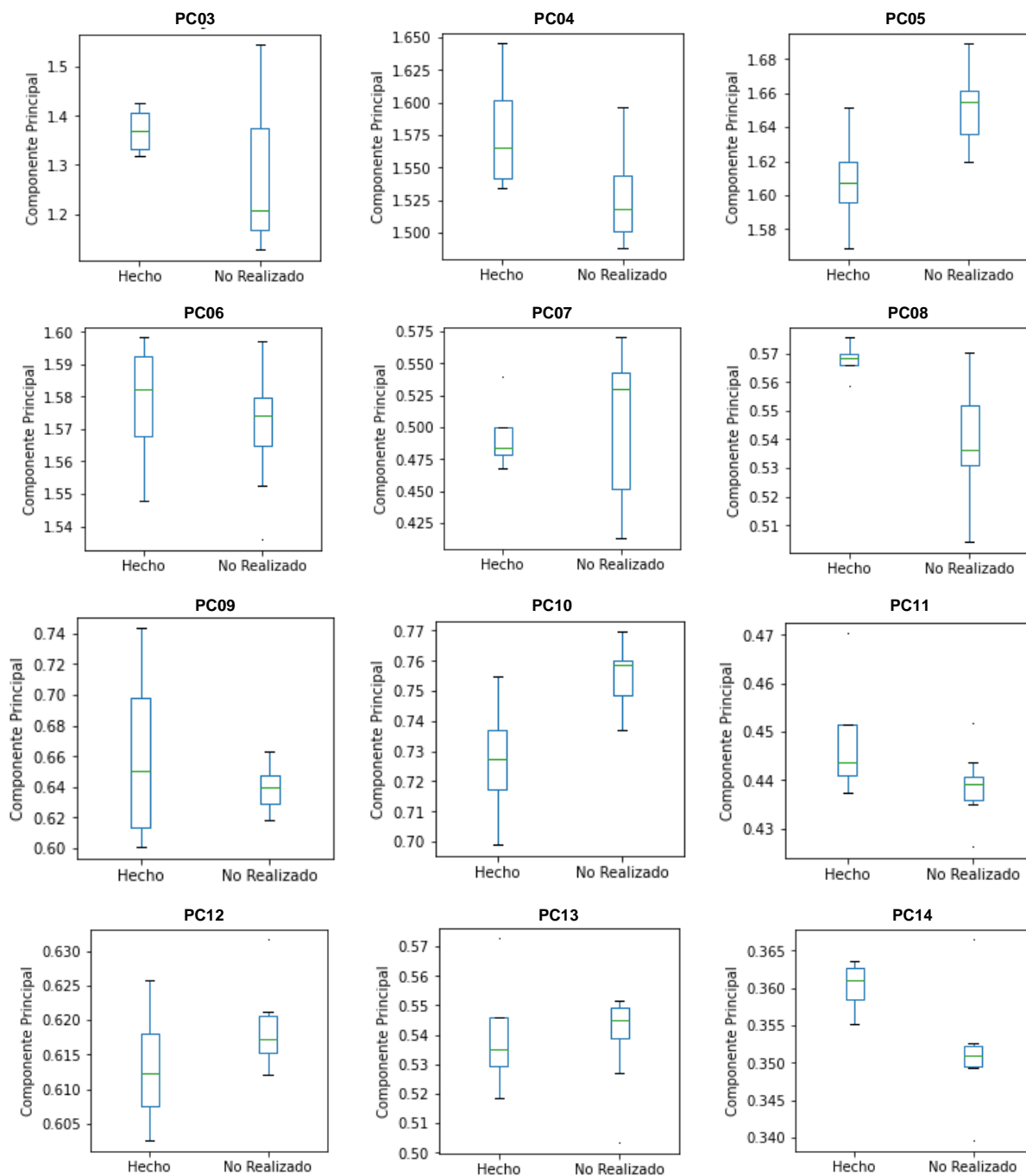


Figura 23. Influencia de las variables (bandas) en cada componente (desde la PC01 hasta la PC16)

A continuación, se muestran los diagramas de cajas de todas las especies, para el periodo de 2014-2016, de las Componentes Principales 03 a 16 para este tercer método:

5.3.1. HAYA



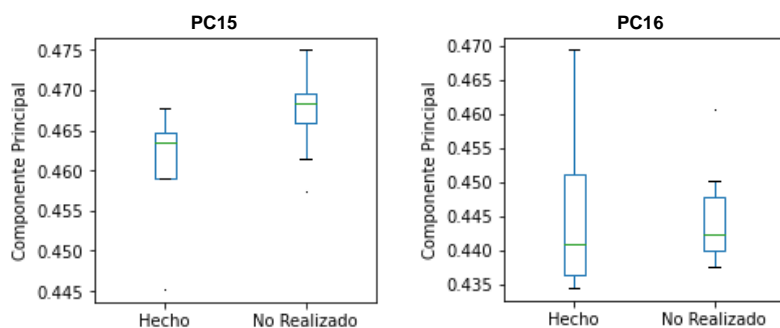


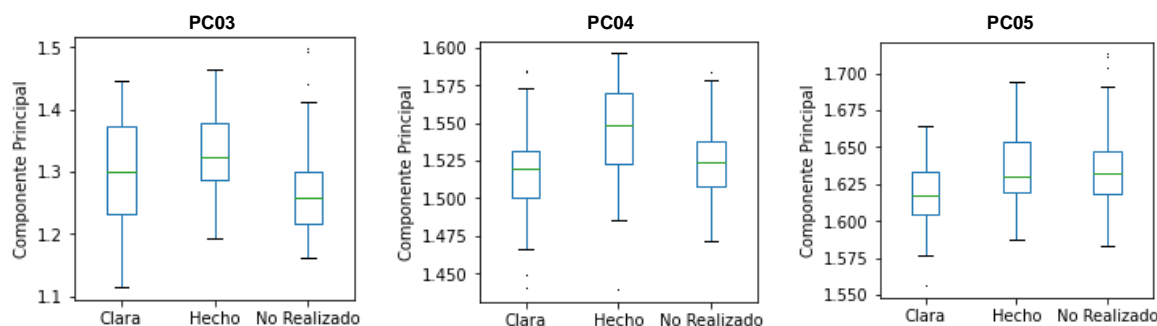
Figura 24. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Haya 2014-2016

Para los recintos del periodo 2014-2016 de haya, las Componente PC05, PC08, PC10 y PC14 son significativas, según el test no paramétrico (Tabla 24). En estas componentes los hechos presentan una separabilidad notable respecto a los recintos no ejecutados. Para el caso de la PC05 y la PC10 (Figura 24), aunque los recintos no ejecutados presentan un valor mayor en la Componente Principal respecto a los hechos, la separabilidad entre ambos aprovechamientos es evidente, permitiendo distinguir las cortas definitivas de manera efectiva.

Tabla 24. Resultado test de Kruskal Wallis para Haya 2014-2016. Método PCA

HAYA 2014-2016				HAYA 2014-2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo	PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	1.413	0.234	NO	10	4.875	0.027	SI
04	3.490	0.062	NO	11	1.846	0.174	NO
05	4.875	0.027	SI	12	1.038	0.308	NO
06	0.462	0.497	NO	13	0.260	0.610	NO
07	0.260	0.610	NO	14	4.154	0.042	SI
08	4.154	0.042	SI	15	2.337	0.126	NO
09	0.000	1.000	NO	16	0.260	0.610	NO

5.3.2. QUERCUS



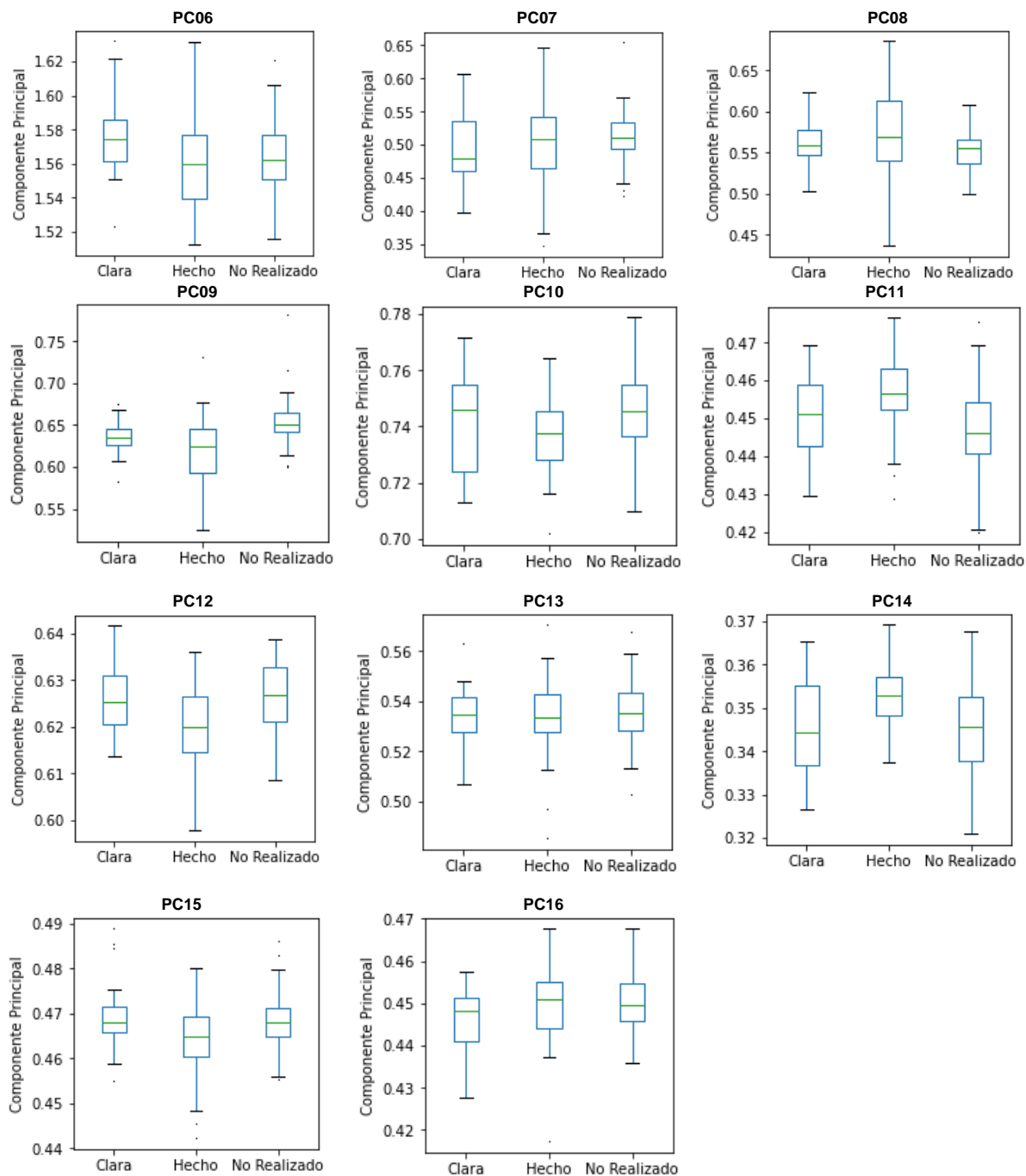


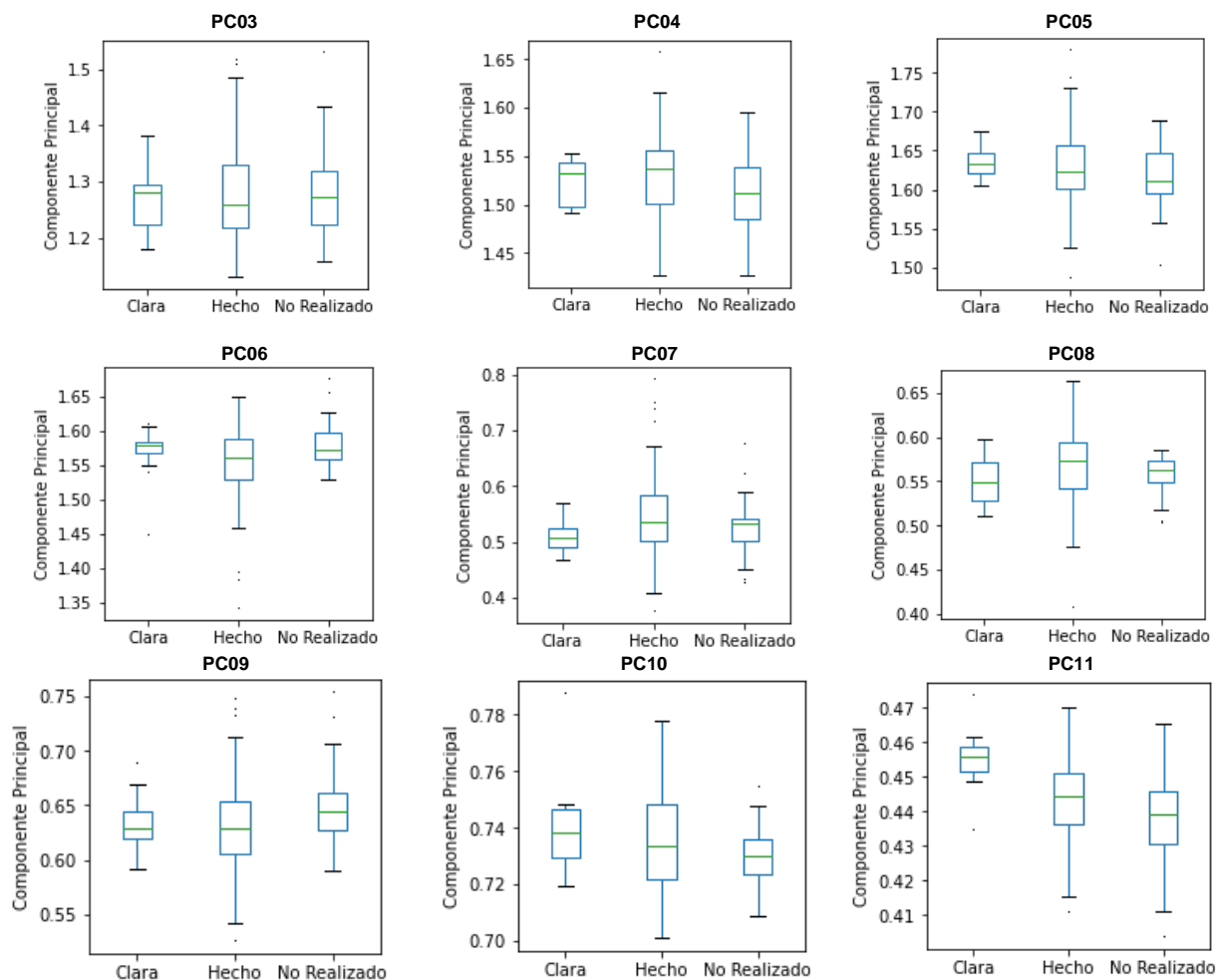
Figura 25. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Quercus 2014-2016

Para el caso del Quercus, en este periodo se presentaron 11 Componentes significativas de las 14 evaluadas (Tabla 25). Los hechos presentan una mayor separabilidad en las Componentes PC04, PC08, PC11, PC12, PC14 y PC15, mientras que la PC06 evidencia rangos de variación similares entre todos los aprovechamientos, lo que impide distinguir alguno efectivamente. Por su parte, las claras son más representativas en la PC05. Los recintos no ejecutados se distinguen en las Componentes PC03, PC09 y PC10, al presentar el menor solape respecto a las claras y los hechos entre las cajas de sus respectivos diagramas (Figura 25). Las componentes PC07, PC13 y PC16 no fueron significativas.

Tabla 25. Resultado test de Kruskal Wallis para Quercus 2014-2016. Método PCA

QUERCUS 2014-2016				QUERCUS 2014-2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo	PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	20.637	0.000	SI	10	8.544	0.014	SI
04	16.551	0.000	SI	11	20.440	0.000	SI
05	8.436	0.015	SI	12	21.008	0.000	SI
06	7.797	0.020	SI	13	0.694	0.707	NO
07	2.089	0.352	NO	14	16.986	0.000	SI
08	7.227	0.027	SI	15	9.962	0.007	SI
09	25.715	0.000	SI	16	2.578	0.275	NO

5.3.3. OTRAS FRONDOSAS



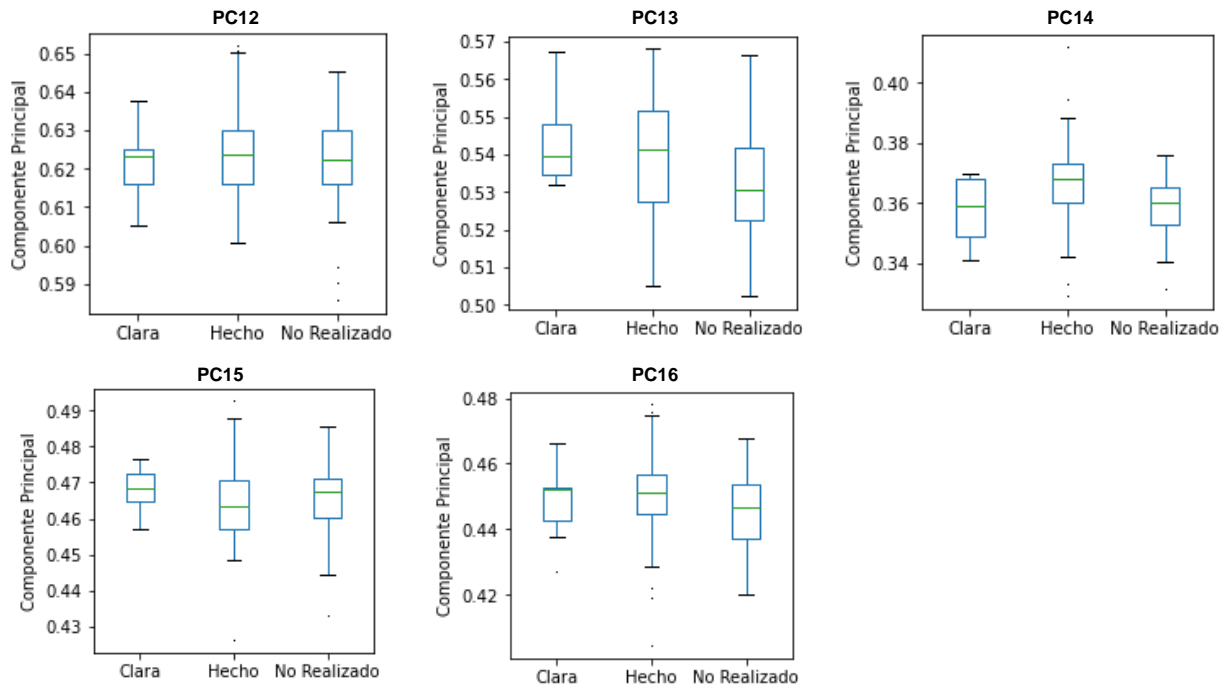


Figura 26. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Otras Frondosas 2014-2016

En las Otras Frondosas, la PC05 evidenció mayor separabilidad para las claras y la PC14 resultó ser efectiva para distinguir los hechos. De acuerdo al test de Kruskal Wallis (Tabla 26), aunque las Componentes PC04, PC08 y PC09 son significativas, en los diagramas de cajas (Figura 26), se observa que los tres aprovechamientos presentan solapes en el rango intercuartil, impidiendo determinar gráficamente, el aprovechamiento que presenta las mayores diferencias significativas.

Tabla 26. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Frondosas 2014-2016. Método PCA

OTRAS FRONDOSAS 2014-2016				OTRAS FRONDOSAS 2014-2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo	PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	0.200	0.905	NO	10	2.603	0.272	NO
04	6.847	0.033	SI	11	11.692	0.003	SI
05	1.946	0.378	NO	12	1.099	0.577	NO
06	2.640	0.267	NO	13	5.776	0.056	NO
07	4.489	0.106	NO	14	20.141	0.000	SI
08	6.677	0.035	SI	15	2.699	0.259	NO
09	7.247	0.027	SI	16	1.972	0.373	NO

5.3.4. PINO LARICIO

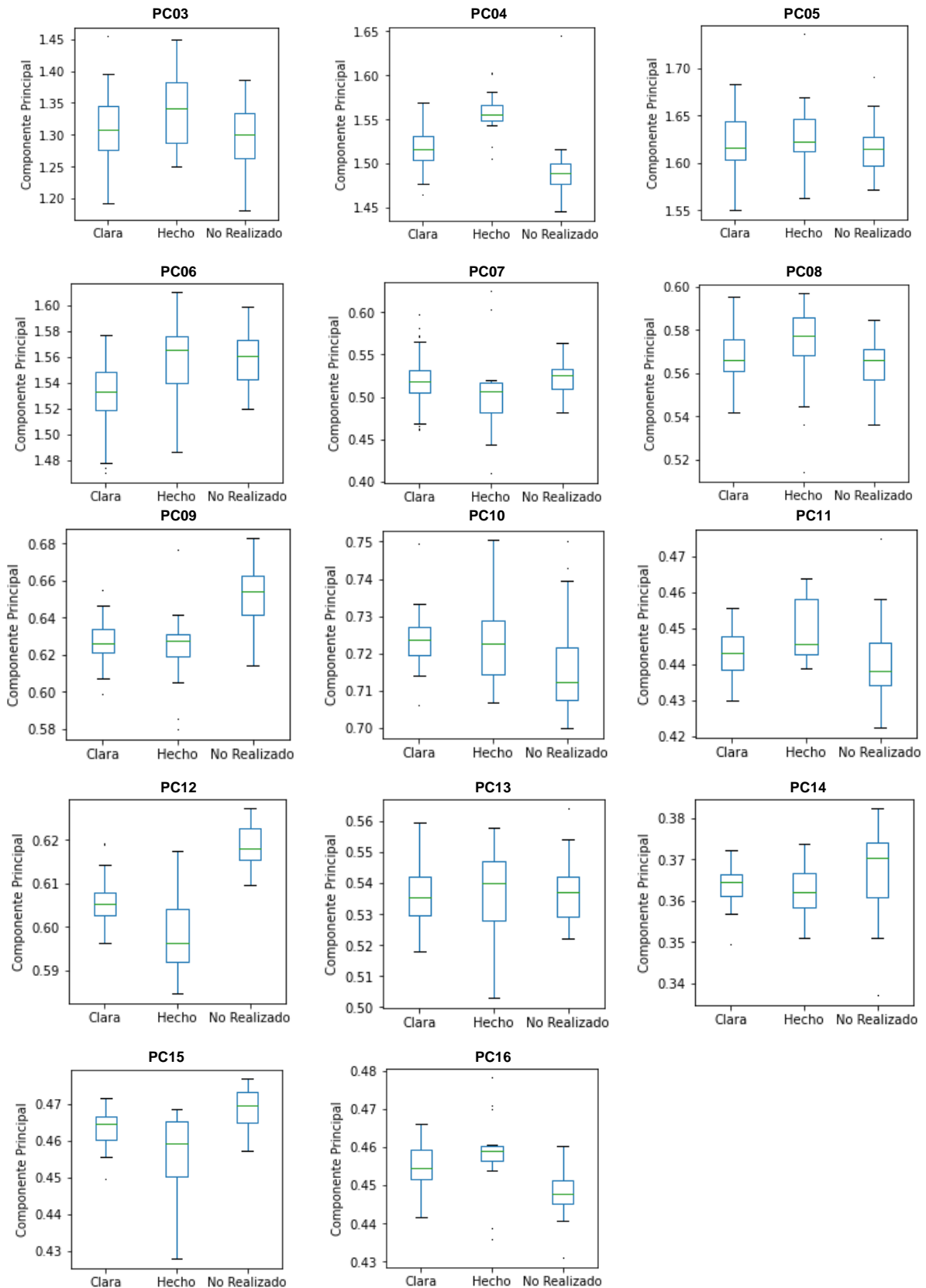


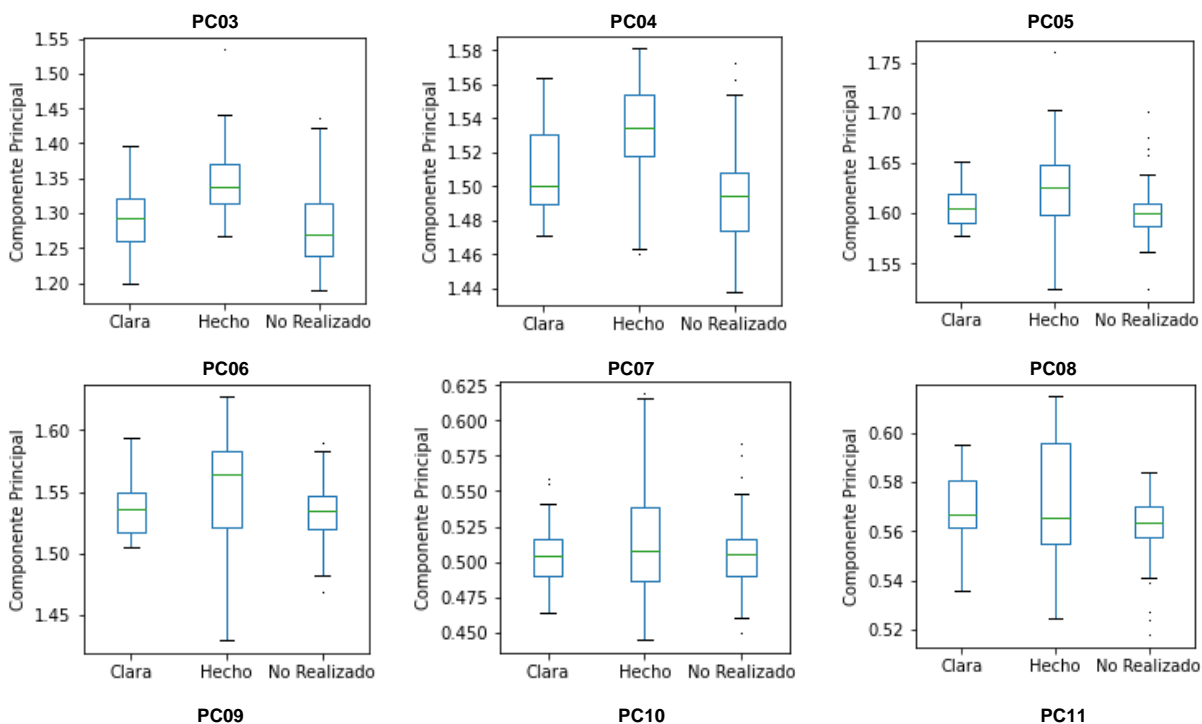
Figura 27. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Pino Laricio 2014-2016

Para el pino laricio del periodo de 2014-2016, las Componentes PC04, PC07, PC08 y PC11 presentaron resultados significativos, donde la mayor separabilidad se evidencia en las cortas definitivas. En la PC06, las claras muestran la mayor separabilidad respecto a los otros aprovechamientos. Por su parte, las Componentes PC09, PC10, PC12, PC15 y PC16 destacan los recintos no ejecutados.

Tabla 27. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Laricio 2014-2016. Método PCA

PINO LARICIO 2014-2016				PINO LARICIO 2014-2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo	PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	4.894	0.087	NO	10	16.041	0.000	SI
04	49.598	0.000	SI	11	11.627	0.003	SI
05	2.467	0.291	NO	12	63.687	0.000	SI
06	26.164	0.000	SI	13	0.128	0.938	NO
07	7.241	0.027	SI	14	6.333	0.042	SI
08	6.261	0.044	SI	15	24.372	0.000	SI
09	39.404	0.000	SI	16	31.026	0.000	SI

5.3.5. PINO SILVESTRE



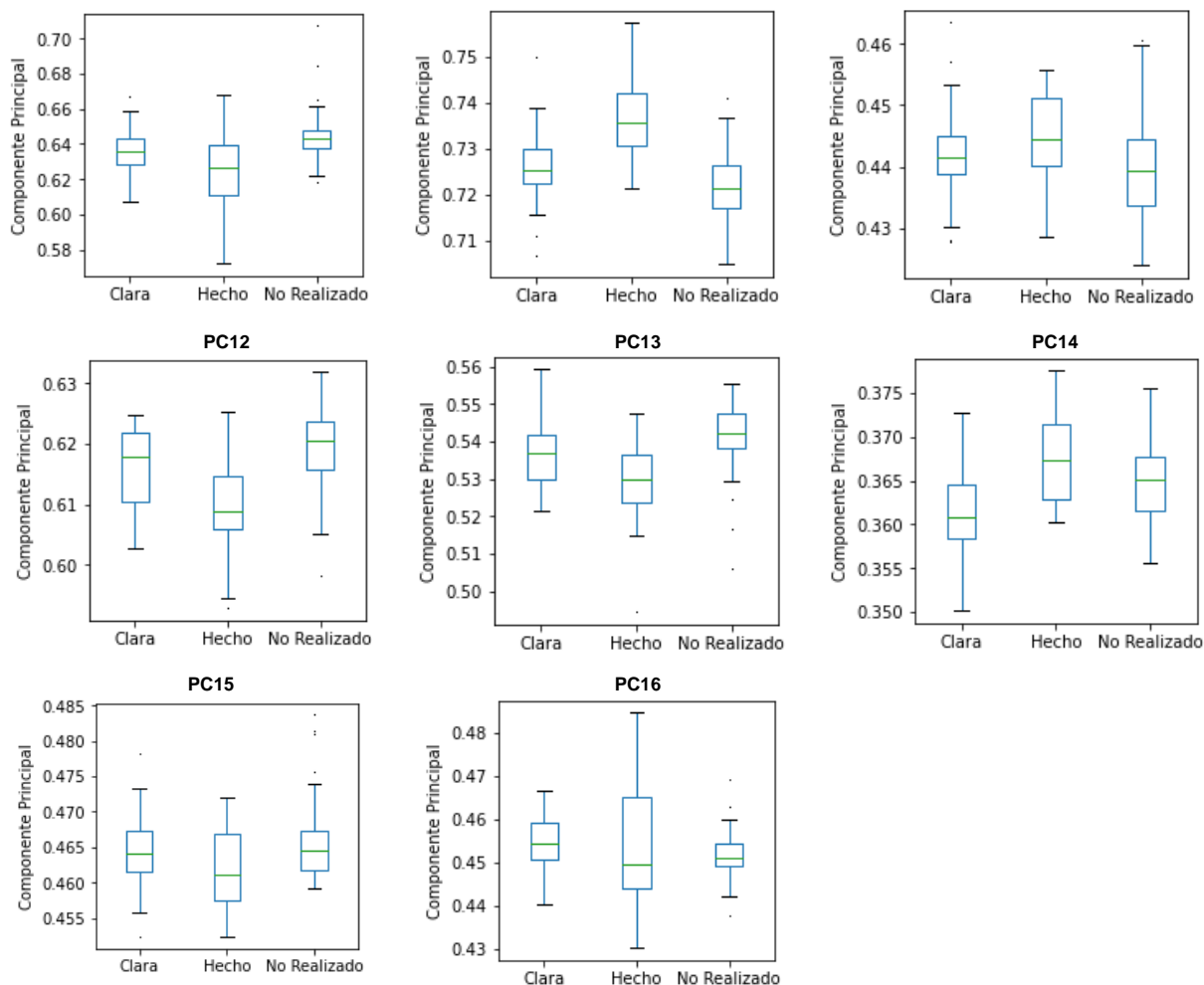


Figura 28. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Pino Silvestre 2014-2016

En el pino silvestre, según la prueba no paramétrica, 11 de las 14 Componentes arrojaron resultados significativos (Tabla 28). Las Componentes PC03, PC04, PC05, PC06, PC09, PC10, PC12, PC13 y PC14 son efectivas para los hechos. Las Componentes PC11 y PC15, a pesar de su significancia, no permiten distinguir algún aprovechamiento, ya que según los diagramas de cajas (Figura 28), se presentan solapes entre los rangos intercuartiles de los tres aprovechamientos.

Tabla 28. Resultado test de Kruskal Wallis para Pino Silvestre 2014-2016. Método PCA

PINO SILVESTRE 2014-2016				PINO SILVESTRE 2014-2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo	PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	28.693	0.000	SI	10	42.539	0.000	SI
04	28.061	0.000	SI	11	9.473	0.009	SI
05	7.186	0.028	SI	12	32.390	0.000	SI
06	8.237	0.016	SI	13	33.252	0.000	SI
07	0.822	0.663	NO	14	20.216	0.000	SI
08	5.637	0.060	NO	15	9.079	0.011	SI
09	23.790	0.000	SI	16	5.696	0.058	NO

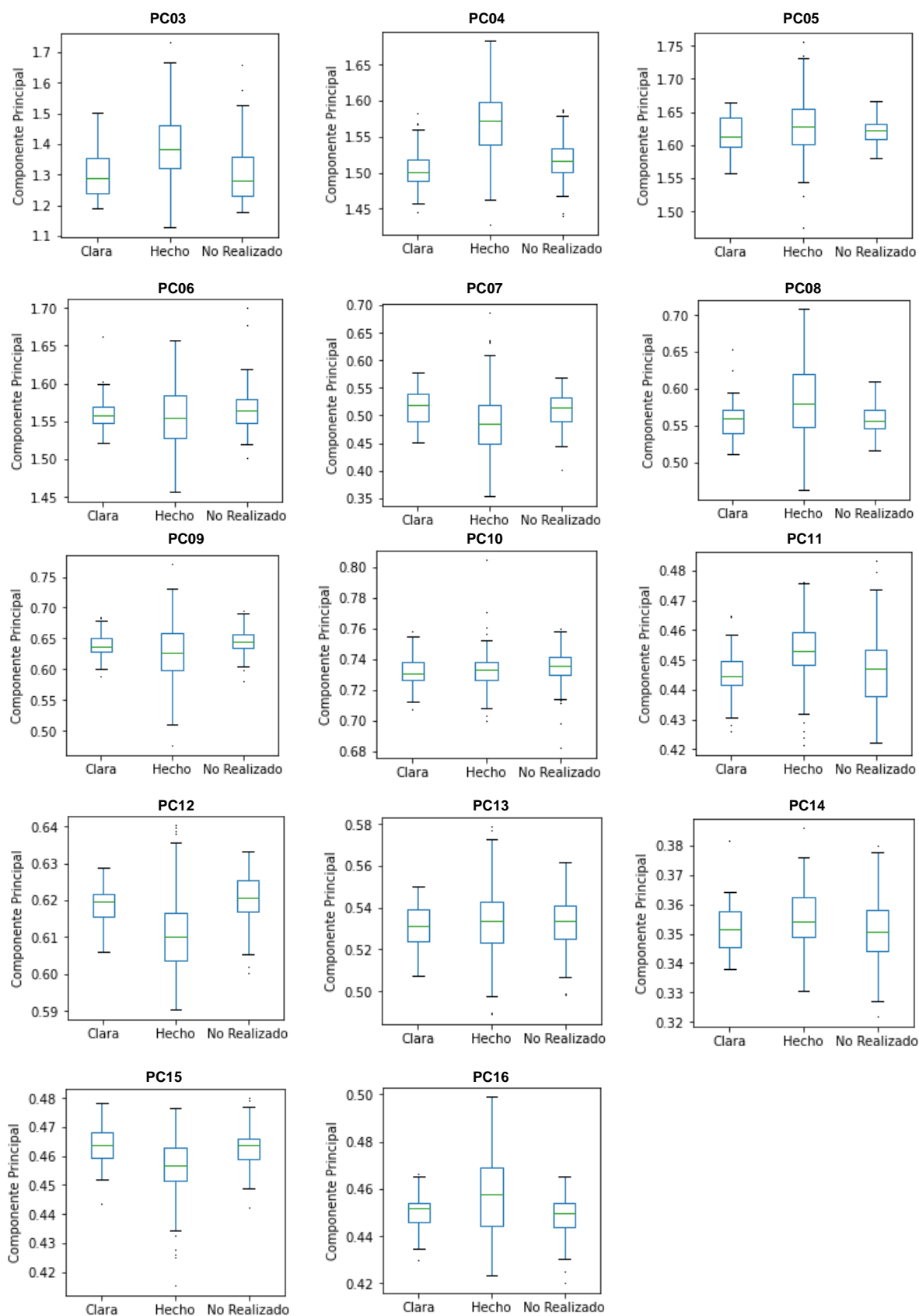
5.3.6. OTRAS CONÍFERAS


Figura 29. Diagramas de cajas de Componentes Principales para Otras Coníferas 2014-2016

Para las otras coníferas de 2014-2016, las Componentes PC03, PC04, PC07, PC08, PC09, PC11, PC12, PC15 y PC16 fueron estadísticamente significativas (*Tabla 29*). Se observa la mayor separabilidad en los hechos. Las componentes PC10 y PC14 a pesar de ser significativas, evidencian solapes entre las cajas, dificultando la interpretación de la separabilidad entre aprovechamientos (*Figura 29*).

Tabla 29. Resultado test de Kruskal Wallis para Otras Coníferas 2014-2016. Método PCA

OTRAS CONÍFERAS 2014-2016				OTRAS CONÍFERAS 2014-2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo	PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	74.689	0.000	SI	10	11.233	0.004	SI
04	137.303	0.000	SI	11	45.197	0.000	SI
05	5.407	0.067	NO	12	107.894	0.000	SI
06	5.606	0.061	NO	13	0.159	0.924	NO
07	37.316	0.000	SI	14	11.405	0.003	SI
08	32.160	0.000	SI	15	57.828	0.000	SI
09	20.929	0.000	SI	16	26.350	0.000	SI

En la *Tabla 30* se resume la información de todas las especies y las PC desde la 03 hasta la 16, para este tercer método, teniendo en cuenta que desde la PC03 se evidencian los cambios. Se indica si las diferencias son significativas (recuadros en color verde) o si no lo son (recuadro rojo). En caso de ser estadísticamente significativas, se indica cual es el aprovechamiento que presentan la mayor separabilidad (C: Clara, H: Hecho, NR: No Realizado). La columna denominada “N” corresponde al número de muestras (polígonos) en cada periodo, donde, en las otras frondosas, se suman los polígonos de las frondosas nobles y en las otras coníferas, se suman los recintos del pino carrasco (de acuerdo a la explicación del apartado 3.2).

En aquellos recuadros de color verde donde no se indica el aprovechamiento es debido a que, aunque el test de Kruskal-Wallis indica que es significativo, en los diagramas de cajas no se aprecia una diferencia notable entre los aprovechamientos que se comparan.

Tabla 30. Resumen de identificación de aprovechamientos por especie y por Componente Principal para el método PCA

MÉTODO 3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES															
HAYA															
PERIODO	N	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2014-2016	12			H			H		H				H		
2016	96					C				NR	H				NR
2017	176	C				H							H	NR	
QUERCUS															
PERIODO	N	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2014-2016	133	NR	H	C			H	NR	NR	H	H		H	H	
2016	55					H	H		NR	H	NR		NR		C
2017	35					H									

OTRAS FRONDOSAS															
PERIODO	N	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2014-2016	137									C			H		
2016	14														
2017	31	H	H		H	H		H	H			H	H		H
PINO LARICIO															
PERIODO	N	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2014-2016	111		H		C	H	H	NR	NR	H	NR			NR	NR
2016	69	H	H						H	H	H	H		H	H
2017	152	H	C		H		C		H	H		H			NR
PINO SILVESTRE															
PERIODO	N	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2014-2016	139	H	H	H	H			H	H		H	H	H		
2016	52	H	H		H			H		H	H	H	H		H
2017	61	H				NR								H	
OTRAS CONÍFERAS															
PERIODO	N	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2014-2016	407	H	H			H	H	H		H	H			H	H
2016	137		H	H								H			
2017	146	H			H	H			C			H	H		

En la tabla anterior, se observa que a diferencia de los métodos de Imágenes diferencia y Coeficiente de Variación, existe una mayor cantidad de información que no es estadísticamente significativa, principalmente para el periodo de 2017. Sin embargo, cabe resaltar que en el análisis de Componentes Principales existe una mayor variedad de aprovechamientos que se pueden identificar, aunque sigue siendo el hecho el que sobresale en la mayoría de componentes significativas, pero en contraste, en muchas bandas no se puede diferenciar el aprovechamiento que presenta los datos significativos.

Aunque los recintos de 2014-2016 son los que muestran datos más estadísticamente significativos respecto a los demás periodos, también evidencia una cantidad considerable de datos que no permiten diferenciar un aprovechamiento concreto.

Para el haya, 2016 es el periodo más significativo, donde en las diferentes componentes se pueden distinguir los tres tipos de aprovechamientos. En 2014-2016, las Componentes PC05, PC08, PC10 y PC14 permiten distinguir hechos. Por su parte, para 2017, del mismo modo que en 2014-2016, solo 4 componentes son significativas. A pesar de que 2017 presenta una cantidad mayor de polígonos (176 en total, respecto a 12 de 2014-2016 y 96 de 2016), este periodo no resulta ser el más significativo, como sí ocurría en el método de Imagen Diferencia. Ya que el hecho es el aprovechamiento que sobresale en mayor medida con este método, se contabiliza un total de 7 componentes donde se logró identificar este aprovechamiento favorablemente.

Para el quercus, el periodo de 2014-2016 es el más significativo. En este periodo, se pueden distinguir los tres tipos de aprovechamientos en las componentes que resultaron favorables. Sucede del mismo modo en el periodo de 2016, aunque en componentes como la PC04 y PC05 no es posible establecer

qué aprovechamiento presenta la mayor separabilidad con confianza. Por otro lado, 2017 no fue el periodo más favorable para el quercus, ya que solo la Componente PC07 fue significativa para los hechos. Para esta especie, en 10 componentes se identifican hechos en los tres periodos.

Para el caso de las otras frondosas, 2017 es el periodo más significativo en relación a los hechos. Es interesante observar que, aunque 2017 no es el periodo con la mayor cantidad de recintos (31 en total), este periodo arroja resultados más favorables que 2014-2016, que cuenta con 137 polígonos. Para 2016 solo fue significativa la CP08, pero no es factible diferenciar algún tipo de aprovechamiento. En total, 17 Componentes permiten distinguir hechos favorablemente.

El pino laricio evidencia una mayor cantidad de componentes significativas en 2014-2016, donde se observan resultados favorables para los tres aprovechamientos en las distintas componentes significativas. Este mismo comportamiento se evidencia en el periodo de 2017. Por su parte, el periodo de 2016, fue significativo para los hechos. En esta especie se lograron distinguir un total de 17 componentes donde los hechos fueron significativos.

Para el pino silvestre, 2014-2016 fue el periodo con mejores resultados significativos, donde se evidencia una mayor separabilidad para los hechos. En 2016, todas las bandas significativas, son favorables para la detección de hechos. En 2017, únicamente las Componentes PC03 y PC15 fueron representativas para las cortas definitivas y la PC07 para los recintos sin aprovechamiento. En esta especie es la que mayor cantidad de recintos de hecho se detectaron, con 20 en total.

Para las otras coníferas, 2014-2016 fue el periodo más relevante, coincidiendo con que es el periodo que presenta la mayor cantidad de recintos (407 en total). Se logró identificar hechos en 9 Componentes de las 11 que resultaron significativas. Para 2016, sucedió algo similar al periodo anterior, donde solo los hechos se identificaron favorablemente en las Componentes PC04, PC05 y PC13, de las 7 componentes significativas. Este periodo presenta la menor cantidad de polígonos, con un total de 137. 2017 arrojó 8 Componentes favorables, donde la mayoría, fueron efectivas para los hechos. Las cortas definitivas sobresalen en 17 Componentes Principales.

Para el PCA, en el periodo de 2014-2016, la componente que presentó una mayor cantidad de datos significativos fue la PC14, para especies como haya, quercus, otras frondosas y pino silvestre. En 2016, la Componente PC04 fue la más relevante en pino laricio, pino silvestre y otras coníferas y en 2017 la Componente PC03, lo fue para otras frondosas, pino laricio, pino silvestre y coníferas. En todos los casos mencionados, los hechos presentaron la mayor separabilidad.

En este método, el orden de las especies de mayor a menor separabilidad detectada para el caso de las cortas definitivas es el siguiente: pino silvestre, otras coníferas, pino laricio, quercus, otras frondosas y haya.

6. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo era evaluar la posibilidad de detectar de manera eficiente los aprovechamientos forestales clasificados como hecho, clara y no realizado, utilizando diferentes técnicas de detección de cambios en imágenes Sentinel-2 de los años 2016 a 2019, correspondientes a la estación de verano.

Una vez se analizaron los tres métodos de detección de cambios, se concluye que, las imágenes Sentinel-2 del compuesto de verano, resultaron ser efectivas para la detección de hechos, principalmente en especies como pino silvestre y otras coníferas, con métodos como las Imágenes Diferencia y el Análisis de Componentes Principales. Respecto al método de Coeficiente de Variación, resulta ser efectivo para especies como el pino silvestre y el quercus.

Una especie que no presentó resultados muy favorables para la detección de cortas definitivas fue el haya, ya que en ningún método sobresalió de manera efectiva, lo que indica que la detección de aprovechamientos en esta especie puede resultar más compleja, al menos con las condiciones y metodologías empleadas en este trabajo.

Respecto a la verificación de claras, los resultados no son muy favorables ya que su detección se vio muy limitada a unas pocas bandas de los tres métodos. El pino laricio, en el método de Imágenes Diferencia es la especie que permite diferenciar claras en mayor medida.

Por otro lado, también se puede establecer, que, en los métodos de Imágenes Diferencia y Coeficiente de Variación, especies como el haya, el quercus y el pino silvestre tienen bandas significativas en un periodo, pero esas mismas bandas, en otro periodo resultan no ser efectivas para distinguir aprovechamientos. De acuerdo a los análisis realizados, esta variación está relacionada con la cantidad de polígonos que se tienen de esas especies en los diferentes periodos, resultando ser más significativos aquellos que tienen una mayor cantidad de recintos.

En cuanto a los Índices de Vegetación, en términos generales, para el método de Imágenes Diferencia, el NBR fue el índice más significativo, seguido del NDVI y por último está el NDII. Respecto al método de Coeficiente de Variación, los índices fueron más significativos que las bandas espectrales, donde el NBR también coincide con ser el índice más eficiente para detectar aprovechamientos, pero en este caso, el NDII resultó ser un poco mejor que el NDVI. De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que el NBR es el índice que arroja los mejores resultados, coincidiendo con los estudios que determinan que es un índice adecuado para caracterizar prácticas relacionadas con la tala en diferentes niveles.

De los tres métodos, el Análisis de Componente Principales, muestra los resultados menos significativos en conjunto y además presenta una mayor complejidad y mayor cantidad de bandas que a pesar de ser significativas, en los diagramas de cajas no se puede establecer con certeza cuál es el aprovechamiento con mayor separabilidad. Hay que tener en cuenta, que el test no paramétrico de Kruskal Wallis establece si existen diferencias entre el total de grupos que se comparan. Para este trabajo, este test se aplicó a todos los grupos de aprovechamientos en conjunto, por especie y por banda para cada periodo, por lo tanto, en los casos donde no se puede establecer el tipo de aprovechamiento con certeza a pesar de su significancia, para futuras investigaciones, se sugiere realizar un análisis por pares (por ejemplo, no realizados contra hechos, no realizados contra claras y claras contra hechos), con otros tipos de pruebas no paramétricas, por ejemplo, el U de Mann-Whitney o el test de Dunn, que son más específicos

para comparar dos muestras independientes. No obstante, en este caso, no se realizó un segundo test estadístico, ya que al ser el PCA el método menos efectivo de los tres investigados, no merecía un análisis más profundo.

Investigaciones como la realizada por Tveten (2019), exponen a cerca de la dificultad de seleccionar Componentes Principales relevantes para la detección de cambios, principalmente cuando se trabaja con datos de gran dimensión, por lo tanto, puede darse el caso (o no), de que las componentes que no se evaluaron en este trabajo, presenten información más relevante y significativa.

Debido a que los aprovechamientos tienen un plazo de dos años para ser ejecutados después de su autorización, los recintos de 2017 pueden evaluarse en su totalidad en el año 2019. Para el caso del PCA, se determinó que los recintos de 2017 son los que presentan la mayor cantidad de información que no es estadísticamente significativa, lo cual puede tener relación con la baja ponderación de las bandas de 2019 en las Componentes Principales, según el análisis realizado de la matriz de autovectores.

De los tres métodos investigados, el método de Coeficiente de Variación presenta los mejores resultados globalmente, ya que evidencia la mayor cantidad de información significativa y óptima en relación a la verificación de aprovechamientos forestales. Adicionalmente, este método requiere menor procesamiento de imágenes, ya que, utiliza únicamente la Imagen de Coeficiente de Variación para cada banda en todos los periodos, en contraste al método de Imagen Diferencia, que requiere un proceso más extenso, debido al cálculo de imágenes para cada uno de los periodos. Por el contrario, el Análisis de Componentes Principales, es el método que toma más tiempo de procesamiento, como consecuencia de la cantidad de información que se debe ejecutar simultáneamente.

Se puede concluir que este trabajo cumple con los objetivos planteados, que comprueban la efectividad de las imágenes Sentinel-2 para la detección de hechos principalmente. Además, este documento podrá ser una referencia para futuras investigaciones, donde se realicen comparaciones con los compuestos de otras estaciones para el mismo periodo de tiempo y establecer las similitudes y diferencias respecto a la detección de aprovechamientos en estas especies. Igualmente, teniendo en cuenta que este estudio se realizó con 8 grupos de especies, podría considerarse utilizar un nivel de clasificación más específico, que ofrezca un catálogo forestal más diverso, ya que los grupos de las coníferas y las frondosas suelen estar compuestos por alrededor de 15 a 18 especies cada uno.

Así mismo, las empresas dedicadas a actividades relacionadas con aprovechamientos forestales pueden tener una base para considerar el uso de imágenes Sentinel-2 en su día a día y disminuir los tiempos de análisis, evaluación y contar con resultados más verídicos, ya que actualmente muchas de estas actividades se hacen mediante fotointerpretación y llevan mucho tiempo, además que su resultado depende del criterio del fotointérprete.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnall, D. B., Raun, W. R., Solie, J. B., Stone, M. L., Johnson, G. V., Girma, K., Freeman, K. W., Teal, R. K., & Martin, K. L. (2006). Relationship between coefficient of variation measured by spectral reflectance and plant density at early growth stages in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 29(11), 1983–1997. <https://doi.org/10.1080/01904160600927997>
- Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra - ADEMAN. (2020). *Informe sobre movilización de madera en Navarra*. 1–13. <http://www.navarra.es/NR/rdonlyres/2D446A24-443B-4917-8AB9-4A26643E841B/476224/InformeADEMANMovilizacionMadera2020.pdf>
- Bjerreskov, K. S., Nord-Larsen, T., & Fensholt, R. (2021). Classification of nemoral forests with fusion of multi-temporal sentinel-1 and 2 data. *Remote Sensing*, 13(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs13050950>
- Carlà, R., Santurri, L., Bonora, L., & Conese, C. (2009). Multitemporal burnt area detection methods based on a couple of images acquired after the fire event. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI*, 7472, 74720C. <https://doi.org/10.1117/12.832908>
- Castillo, F. J., Imbert, J. B., Blanco, J. A., Traver, C., & Puertas, F. (2003). Gestión forestal sostenible de masas de pino silvestre en el Pirineo Navarro. *Ecosistemas*, 12(3), 9. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/228>
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Moll-Rocek, J., Vieira, I. C. G., & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 45(5), 538–550. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y>
- Chuvienco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledeteccion*, 10, 1–9. https://tig.age-geografia.es/wp-content/uploads/2022/01/Chuvienco_El-Factor-Temporal-en-Teledeteccion_Evolucion-Fenologica-y-Analisis-de-Cambios.pdf
- de Beurs, K. M., & Townsend, P. A. (2008). Estimating the effect of gypsy moth defoliation using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3983–3990. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.008>
- Doxani, G., Vermote, E., Roger, J., Gascon, F., Adriaensen, S., Frantz, D., Hagolle, O., Hollstein, A., & Kirches, G. (2018). Atmospheric Correction Inter-Comparison Exercise. *Remote Sensing*, 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs10020352>
- European Space Agency. (2020). *European Space Agency*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- FAO. (2004). *Programa de Evaluación de los Recursos Forestales - Documento de trabajo 94/S*. <https://www.fao.org/3/ae578s/AE578S00.htm#TopOfPage>

- Gestión Ambiental de Navarra- Servicio de Montes. (2015a). *Plan General Comarca Cantábrica*. 271. https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/ACCCD512-309A-4408-969C-A8972FB1F7E8/337768/PF_Cantabrica_2_2_2017.pdf
- Gestión Ambiental de Navarra- Servicio de Montes. (2015b). *Plan General Comarca Pirenaica*. 293. https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/ACCCD512-309A-4408-969C-A8972FB1F7E8/337762/PF_Pirenaica_2_2_2016.pdf
- Gestión Ambiental de Navarra- Servicio de Montes. (2015c). *Plan General Comarca Zona Media y Ribera*. 316. https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/ACCCD512-309A-4408-969C-A8972FB1F7E8/337990/PG_ZMyR_8Febrero2016compressed.pdf
- Gestión Ambiental de Navarra S.A. (2017). *Diagnóstico del sector forestal Navarro*. 1–115. https://gobiernoabierto.navarra.es/sites/default/files/02_diagnostico_forestal_de_navarra.pdf
- Gholamalifard, M., Esmaili Sari, A., Abkar, A., & Naimi, B. (2013). Bathymetric Modeling from Satellite Imagery via Single Band Algorithm (SBA) and Principal Components Analysis (PCA) in Southern Caspian Sea. *International Journal of Enviromental*, 7(4), 877–886. <https://doi.org/10.22059/IJER.2013.669>
- Ley Foral 13/1990 De protección y desarrollo del patrimonio forestal de Navarra, 1 (1991). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1991-7362#:~:text=La presente Ley Foral tiene,territorio de la Comunidad Foral.>
- Gobierno de Navarra. (2021). *Los Bosques y Montes de Navarra*. http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/Los+bosques+de+Navarra.htm#:~:text=Los bosques son parte inherente,el resto matorrales o pastizales.
- González de Audicana, M. (2016). *Detección de Cambios. Material docente elaborado para la asignatura Teledetección Óptica del Máster Universitario en SIG y Teledetección*. Universidad Pública de Navarra (pp. 1–43).
- González de Audicana, M. (2022a). *Índices espectrales: Índices de Vegetación (IV). Material docente elaborado para la asignatura Teledetección Óptica del Máster Universitario en SIG y Teledetección*. Universidad Pública de Navarra (pp. 1–16).
- González de Audicana, M. (2022b). *Técnicas estadísticas Pre-Clasificación. Material docente elaborado para la asignatura Teledetección Óptica del Máster Universitario en SIG y Teledetección*. Universidad Pública de Navarra (pp. 1–5).
- González Imaz, O. (2021). *Verificación de aprovechamientos forestales mediante imágenes Sentinel-1 del programa Copernicus. Trabajo Fin de Máster, Máster Universitario en SIG y Teledetección*. Universidad Pública de Navarra.
- Gurevitch, J. (2022). Managing forests for competing goals. *Science*, 376(6595), 792–793. <https://doi.org/10.1126/science.abp8463>

- Hervés Blanco, M. A. (2019). *Detección de aprovechamientos forestales mediante imágenes multitemporales del satélite Sentinel-1. Trabajo Fin de Máster, Máster Universitario en SIG y Teledetección.* Universidad Pública de Navarra. <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/35104>
- Hunt, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 43–54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. (2017). *Índice NBR del incendio de Moguer-Doñana.* https://www.inta.es/INTA/gl/blogs/copernicus/BlogEntry_1500630790681#:~:text=El índice NBR es el,la presencia de vegetación viva.
- Jarron, L. R., Hermosilla, T., Coops, N. C., Wulder, M. A., White, J. C., Hobart, G. W., & Leckie, D. G. (2017). Differentiation of Alternate Harvesting Practices Using Annual Time Series of Landsat Data. *Forest*, 1–13. <https://doi.org/10.3390/f8010015>
- Kavvada, A., Metternicht, G., Kerblat, F., & Mudau, N. (2020). Towards delivering on the sustainable development goals using earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 247, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111930>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2003). The normalized burn ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. *US Geological Survey Northern Rocky Mountain Science Center. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center.* <http://nrmssc.usgs.gov/research/ndbr.htm>
- Khorram, S., Koch, F., Van der Wiele, C., & Nelson, S. (2012). *Remote Sensing* (2012 Springer Science & Business Media (ed.); Illustrate). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3103-9>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47:260, 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Lanly, J.-P. (2003). Los factores de la deforestación y de la degradación de los bosques. *XII Congreso Forestal Mundial.* <https://www.fao.org/3/xii/ms12a-s.htm>
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- Miniguano, E. (2016). *Aplicación de la Estadística en la Elaboración de Escritos Científicos.* <https://estadisticaeninvestigacion.wordpress.com/unidad-3/>
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2022). *Biodiversidad y Bosques.* https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/forestal_aprovechamientos.aspx
- Organización de las Naciones Unidas- ONU. (2015). *Objetivos del Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

- Pérez, B., Serna, A., Delgado, J., Caballero, M., & Villa, G. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. In *Copernicus* (Issue 2). https://cursos.cnig.es/pluginfile.php/13346/mod_label/intro/Ficha_Copernicus_Online_2022_1ed.pdf
- Pérez Marín, J. E. (1998). *Los Bosques en Navarra* (Newbooks diciones (ed.); 2nd ed.). Aurkidi Elkarte. https://issuu.com/medioambientenavarra/docs/los_bosques_de_navarra/1
- QuestionPro. (2022). *Prueba de Kruskal-Wallis*. <https://www.questionpro.com/blog/es/prueba-de-kruskal-wallis/>
- Rahman, M., Islam, A., & Rahman, M. (2004). NDVI derived sugarcane area identification and crop condition assessment. *Plan Plus*, 1(2), 1–12. http://www.ida.liu.se/~746A27/Literature/NDVI_derived_sugar_cane_area_identification.pdf
- Rodríguez, V. M., & Bullock, S. H. (2013). Comparacion espacial y temporal de indices de la vegetacion para verdor y humedad y aplicacion para estimar LAI en el Desierto Sonorene. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 611–623. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263127562010>
- Rojas, J. (2019). *Evaluación del índice normalizado de quemas (NBR) para la detección de la extracción selectiva de madera usando imágenes de satélite*. <https://rpubs.com/jgrojas/558291>
- Rouse, W., Haas, H., & Deering, W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (Eds) *Third Earth Resources Technology Satellite–I Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C.*, 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Ruiz Fernández, L. (2017). Métodos de detección de cambios en teledetección. In *Universidad Politécnica de Valencia* (pp. 1–10). https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83139/Ruiz_Métodos_de_detección_de_cambios_en_teledetección.pdf?sequence=1#:~:text=Los métodos de detección de,dependen del problema o aplicación.
- Song, X., Hansen, M. C., Stephen, V., Peter, V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>
- Sonobe, R., Yamaya, Y., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N., & Mochizuki, K. (2018). Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(02), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.12.026019>
- Tveten, M. (2019). Which principal components are most sensitive in the change detection problem? *Stat*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/sta4.252>
- Universidad Pública de Navarra. (2021). *Nuevas herramientas para la gestión forestal basadas en el uso de tecnologías aéreas y satelitales de observación de la tierra (forestOBS)* (pp. 1–28).
- Vázquez Porras, C. A., Aguirre, C., Chocña Rejas, M. A., & Guerrero Salinas, J. B. (2022). Variabilidad

interanual de la temperatura superficial del lago Titicaca usando imágenes MODIS del invierno (2001-2014). *Revista de Investigación de Física*, 25(1), 10–18.
<https://doi.org/10.15381/rif.v25i1.21030>

Xulu, S., Mbatha, N., Peerbhay, K., & Gebreslasie, M. (2020). Detecting harvest events in plantation forest using sentinel-1 and-2 data via google earth engine. *Forests*, 11(12), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/f11121283>

CONTENIDO DE ANEXOS

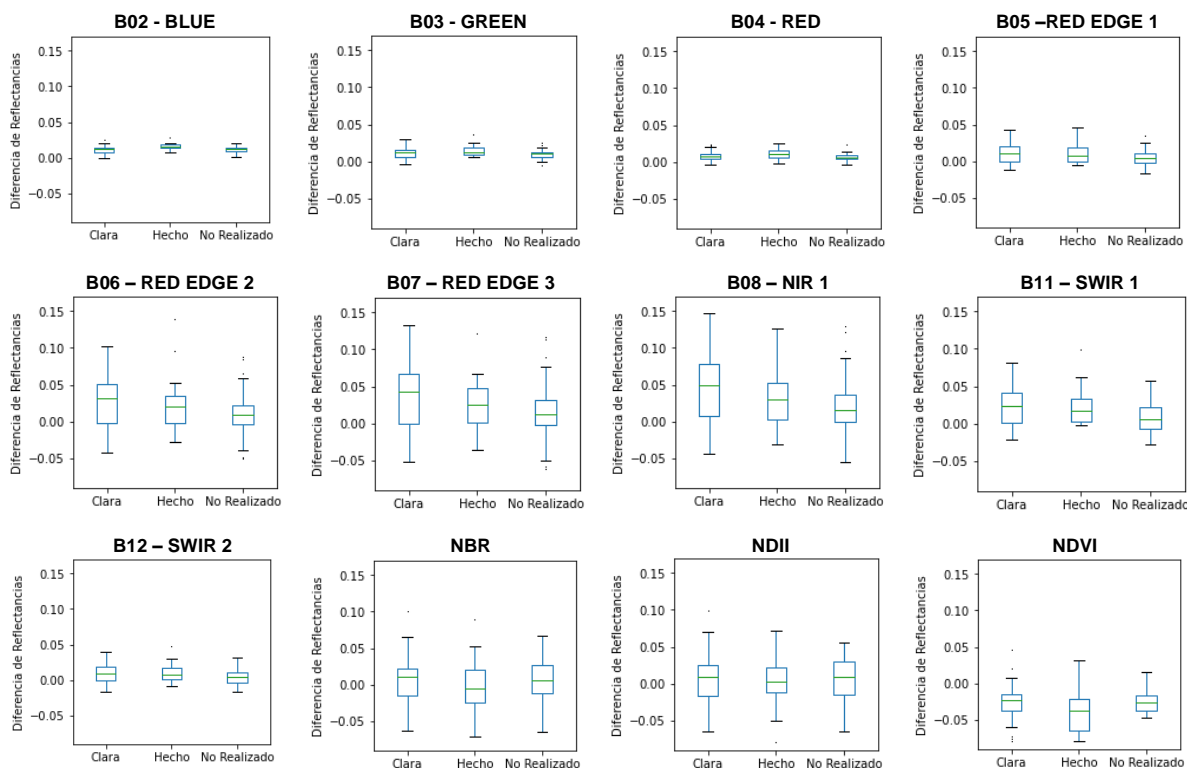
ANEXO 1: ANÁLISIS DE IMÁGENES DIFERENCIA.....	67
1.1. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2016	67
1.2. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2016.....	70
1.3. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2017	71
1.4. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2017	74
ANEXO 2: ANÁLISIS DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN.....	75
2.1. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2016	75
2.2. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2016.....	79
2.3. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2017	80
2.4. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2017	83
ANEXO 3: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	85
3.1. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2016	85
3.2. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2016.....	89
3.3. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2017	90
3.4. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2017	94
3.5. MATRIZ DE AUTOVECTORES.....	96

ANEXOS

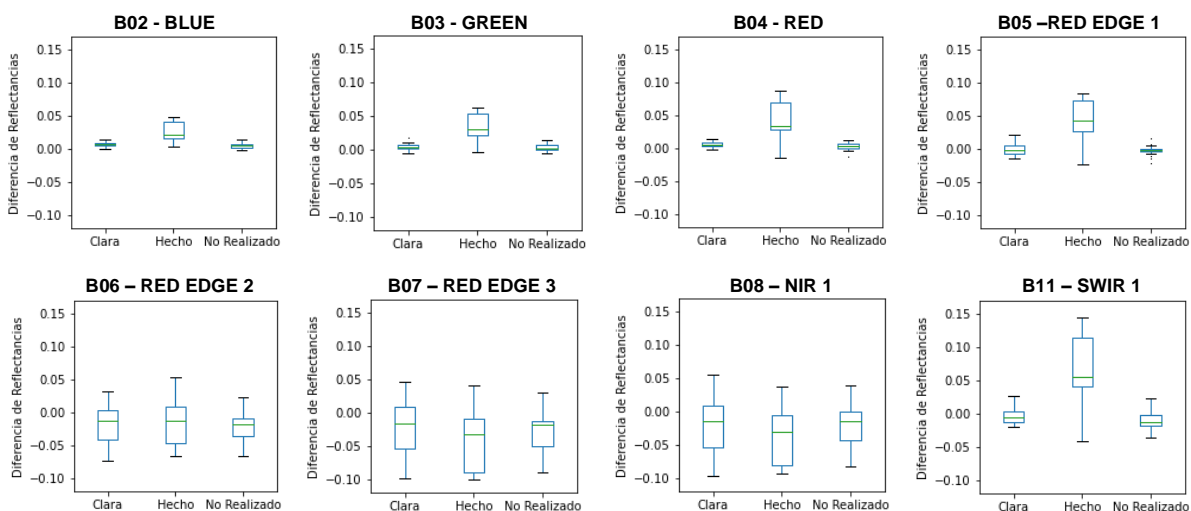
ANEXO 1: ANÁLISIS DE IMÁGENES DIFERENCIA

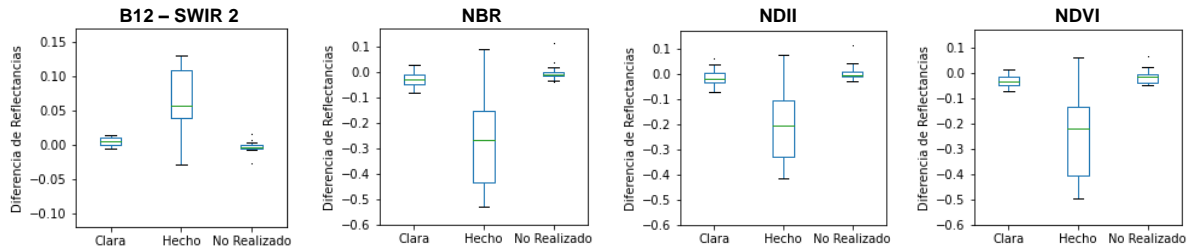
1.1. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2016

❖ HAYA

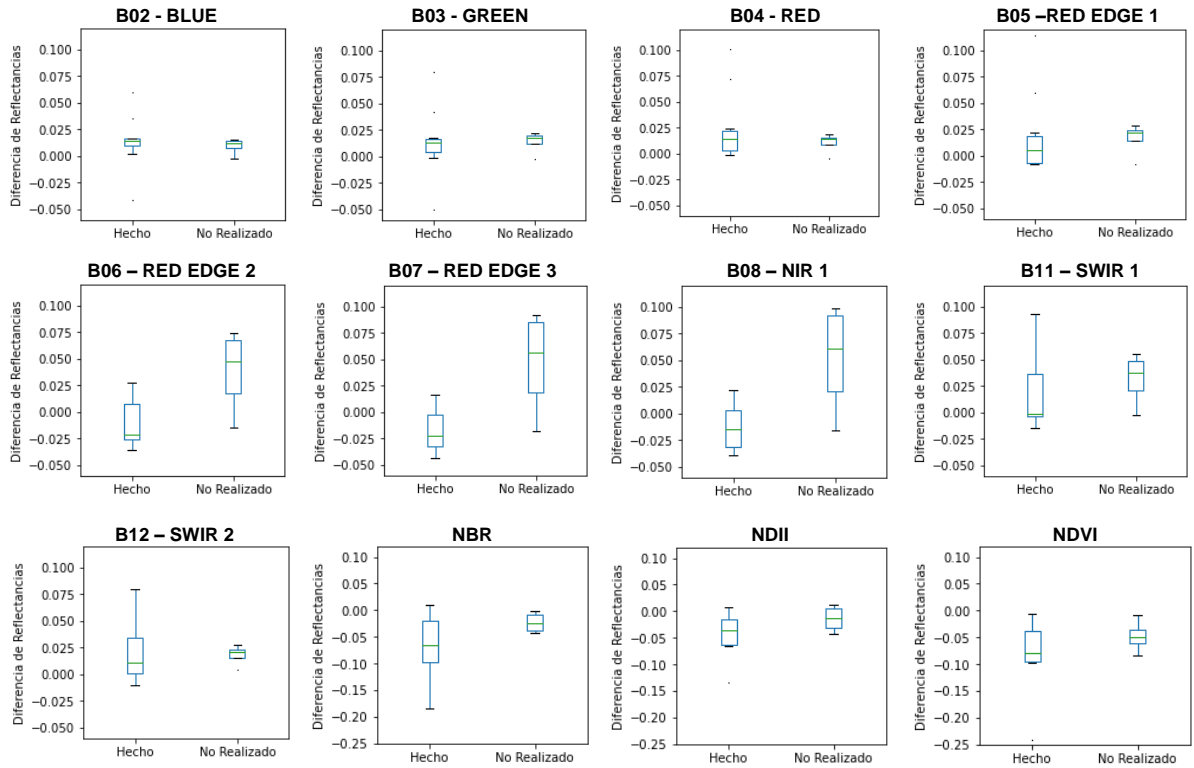


❖ QUERCUS

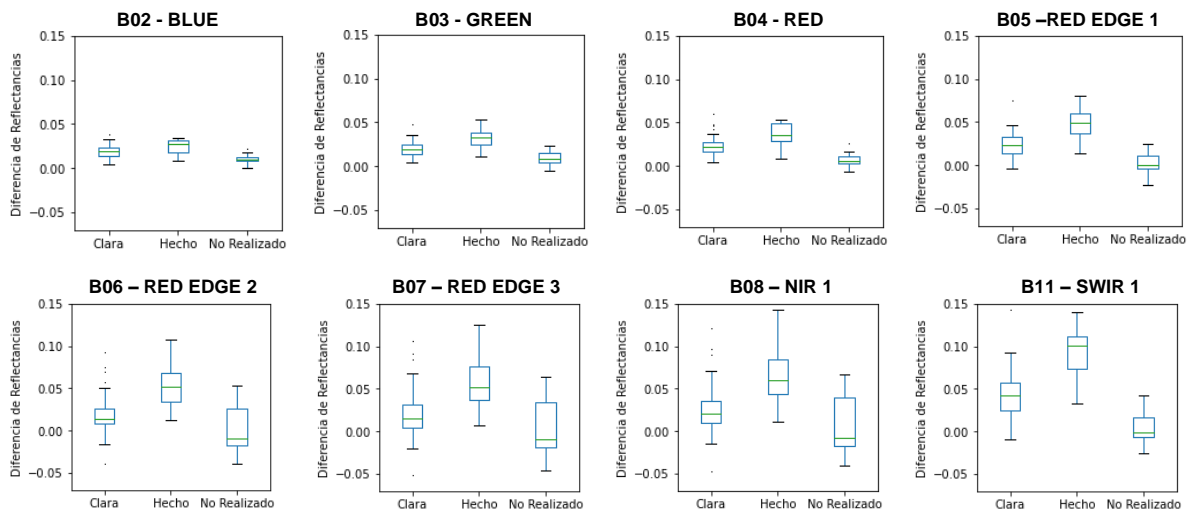


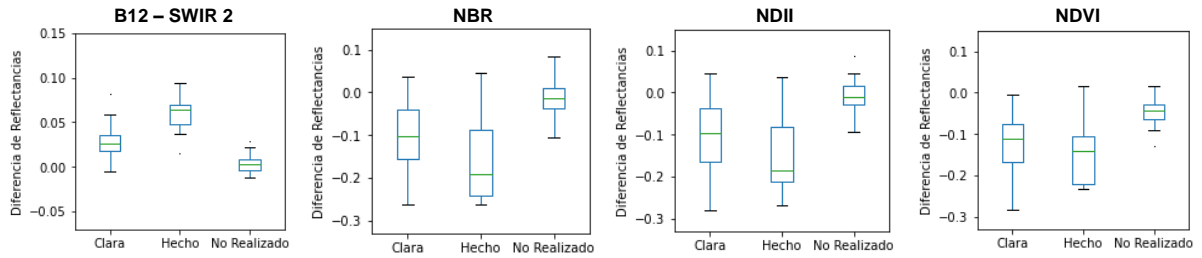
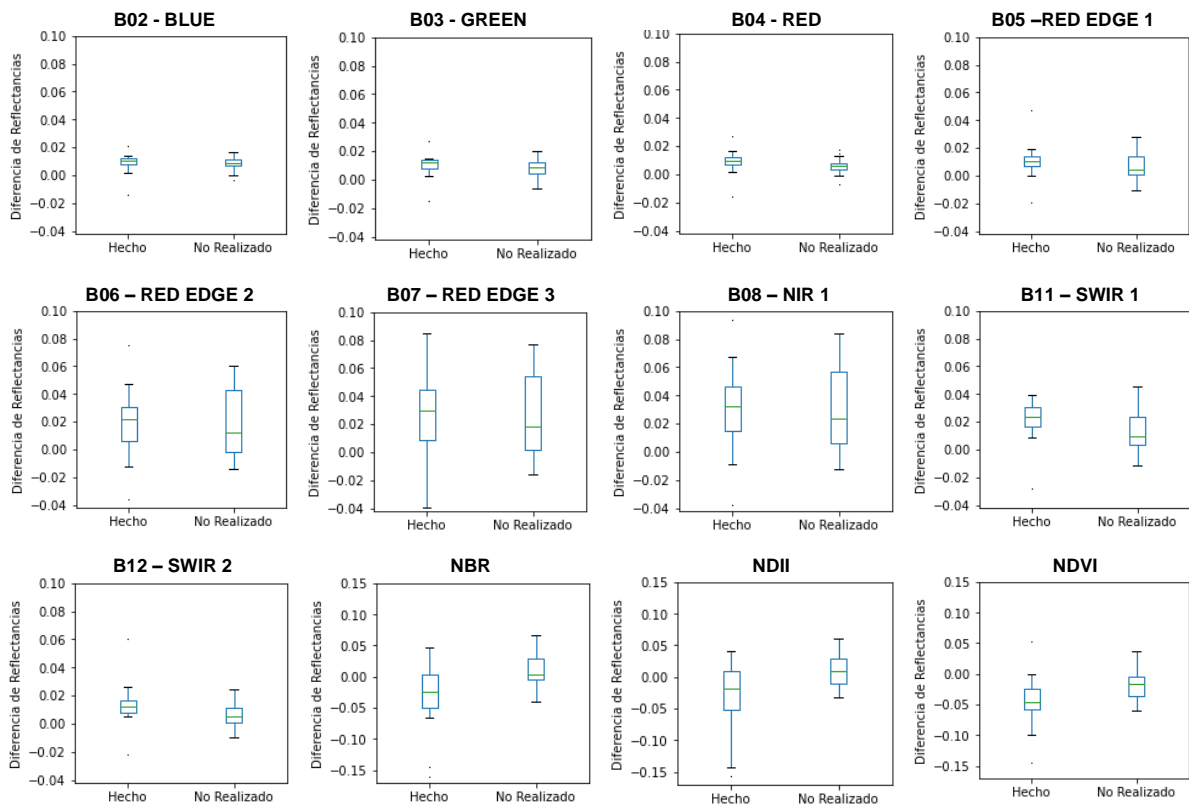
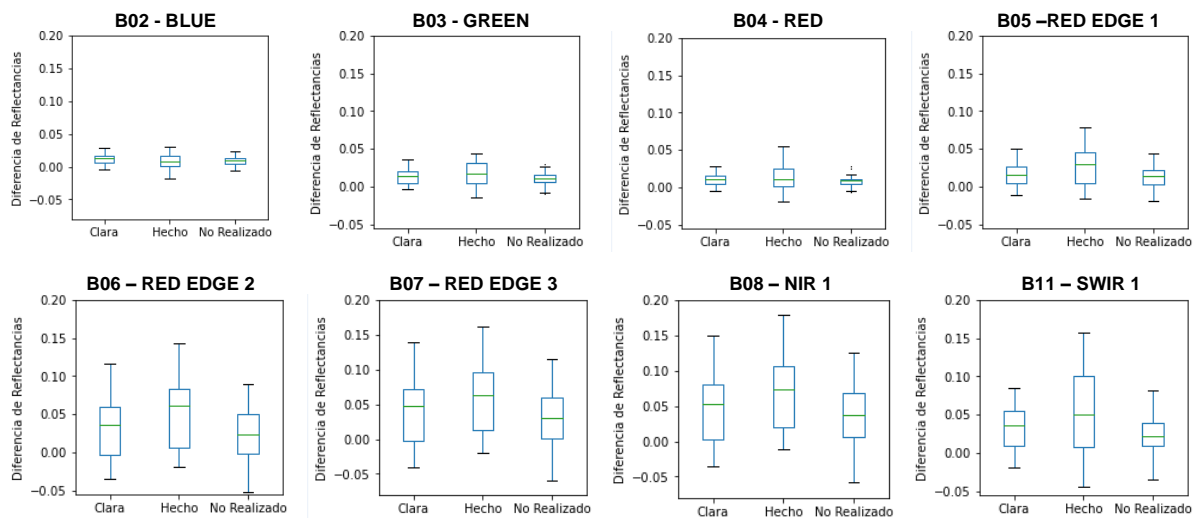


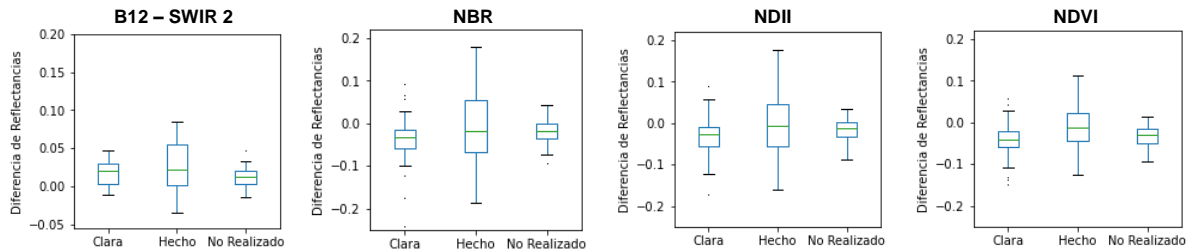
❖ **OTRAS FRONDOSAS**



❖ **PINO LARICIO**




❖ PINO SILVESTRE

❖ OTRAS CONÍFERAS




1.2. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2016

HAYA 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	1.846	0.174	NO
B03	4.154	0.042	SI
B04	1.413	0.234	NO
B05	2.885	0.089	NO
B06	2.337	0.126	NO
B07	1.846	0.174	NO
B08	1.846	0.174	NO
B11	0.721	0.396	NO
B12	0.721	0.396	NO
NBR	0.721	0.396	NO
NDII	0.462	0.497	NO
NDVI	1.038	0.308	NO

QUERCUS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	17.861	0.000	SI
B03	33.135	0.000	SI
B04	20.343	0.000	SI
B05	40.682	0.000	SI
B06	8.749	0.013	SI
B07	2.102	0.350	NO
B08	2.047	0.359	NO
B11	29.427	0.000	SI
B12	29.685	0.000	SI
NBR	10.794	0.005	SI
NDII	8.714	0.013	SI
NDVI	11.950	0.003	SI

OTRAS FRONDOSAS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	16.984	0.000	SI
B03	10.785	0.005	SI
B04	14.019	0.001	SI
B05	7.384	0.025	SI
B06	0.934	0.627	NO
B07	1.137	0.566	NO
B08	1.438	0.487	NO
B11	2.030	0.362	NO
B12	4.962	0.084	NO
NBR	8.721	0.013	SI
NDII	5.562	0.062	NO
NDVI	16.601	0.000	SI

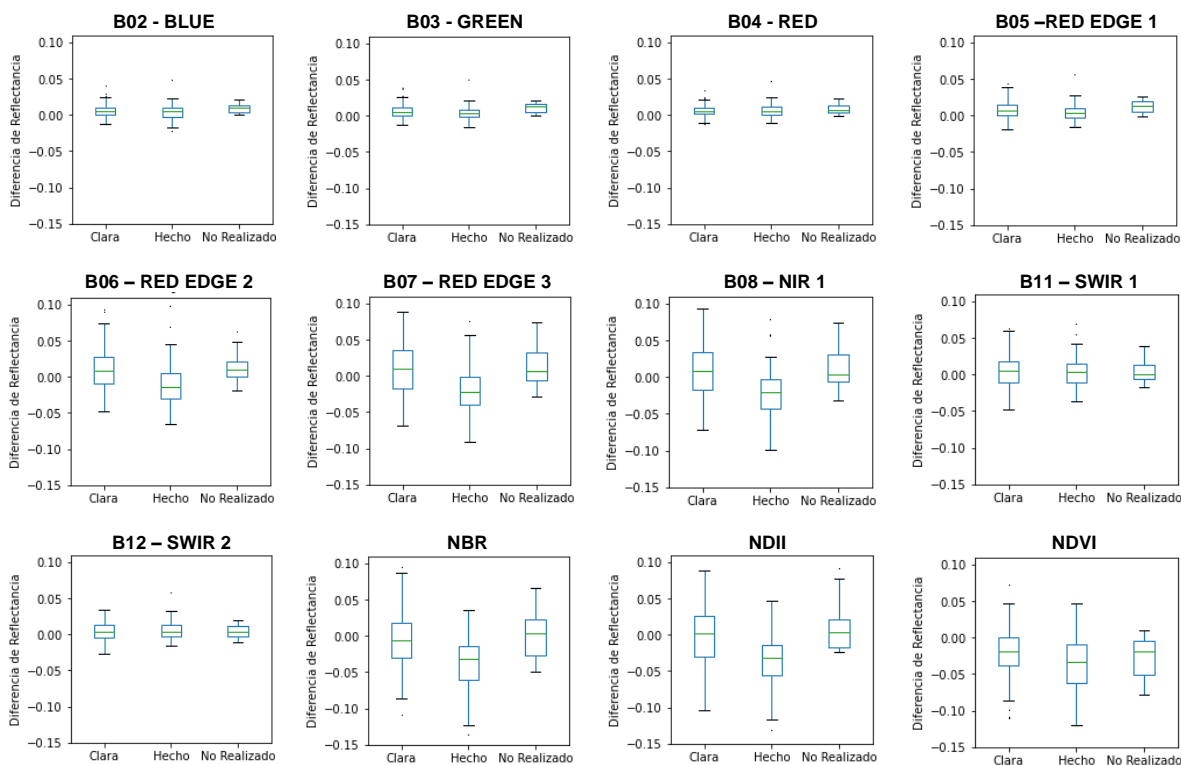
PINO LARICIO 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	5.397	0.067	NO
B03	6.094	0.047	SI
B04	7.641	0.022	SI
B05	7.157	0.028	SI
B06	5.353	0.069	NO
B07	2.906	0.234	NO
B08	4.993	0.082	NO
B11	13.890	0.001	SI
B12	14.851	0.001	SI
NBR	17.137	0.000	SI
NDII	16.318	0.000	SI
NDVI	10.008	0.007	SI

PINO SILVESTRE 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	1.020	0.313	NO
B03	1.459	0.227	NO
B04	5.933	0.015	SI
B05	1.760	0.185	NO
B06	0.032	0.859	NO
B07	0.002	0.968	NO
B08	0.004	0.953	NO
B11	5.186	0.023	SI
B12	8.132	0.004	SI
NBR	7.907	0.005	SI
NDII	8.359	0.004	SI
NDVI	9.300	0.002	SI

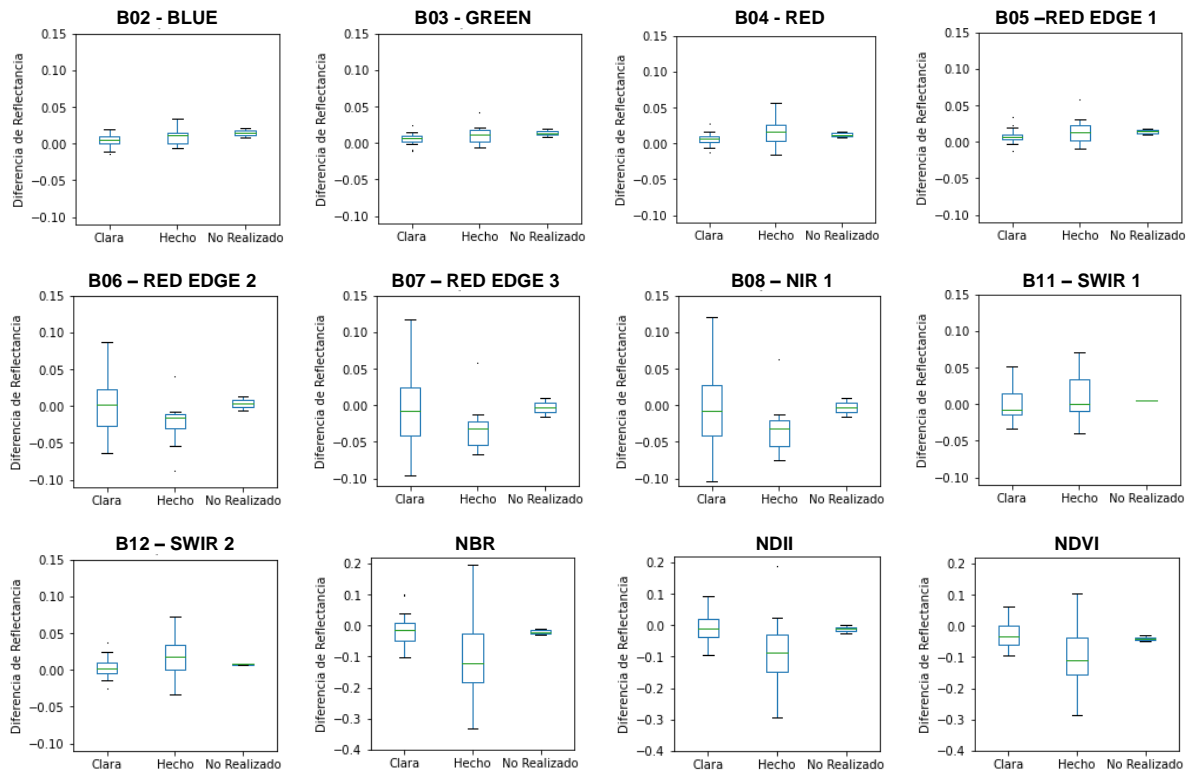
OTRAS CONÍFERAS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	59.936	0.000	SI
B03	105.333	0.000	SI
B04	52.879	0.000	SI
B05	113.503	0.000	SI
B06	88.733	0.000	SI
B07	73.732	0.000	SI
B08	83.846	0.000	SI
B11	91.256	0.000	SI
B12	79.039	0.000	SI
NBR	5.201	0.074	NO
NDII	3.686	0.158	NO
NDVI	4.731	0.094	NO

1.3. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2017

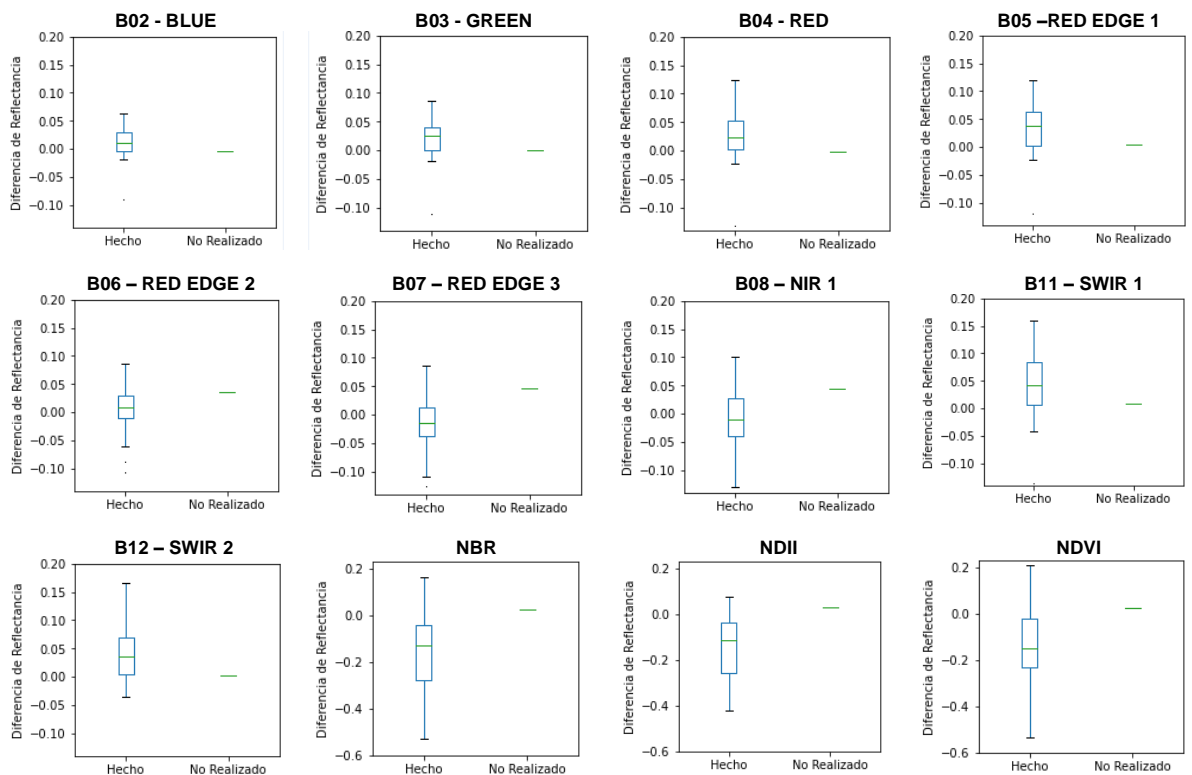
❖ HAYA

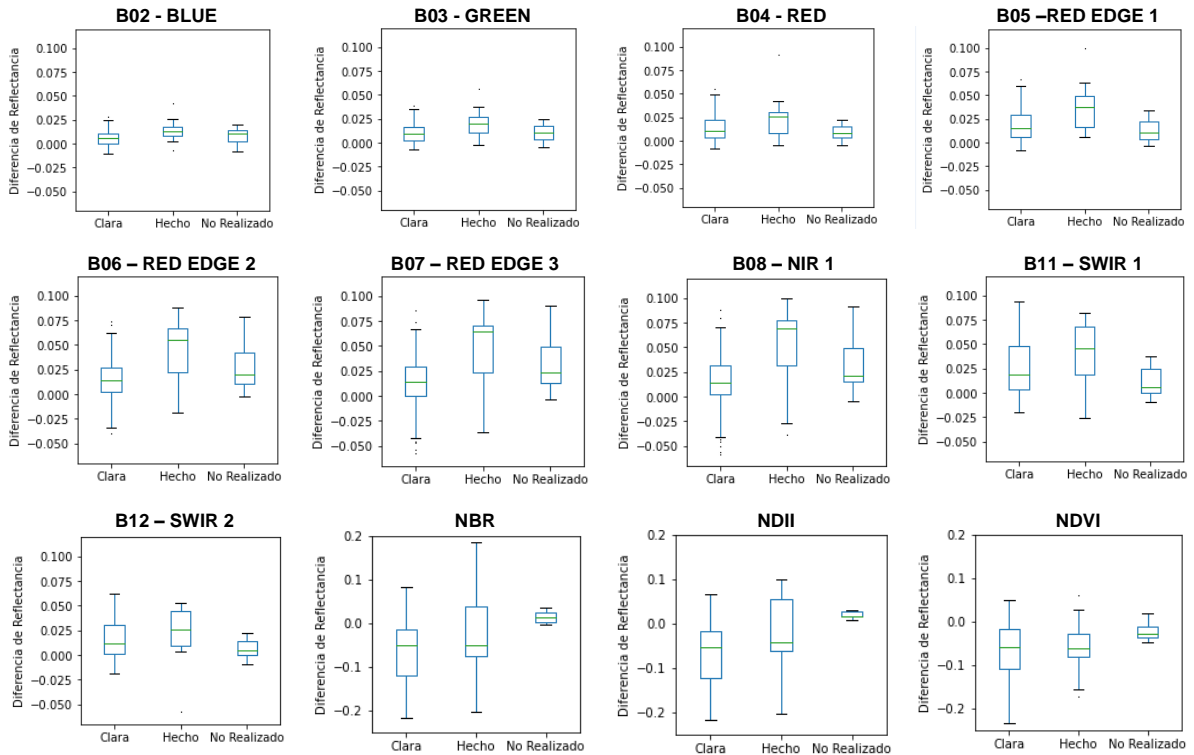
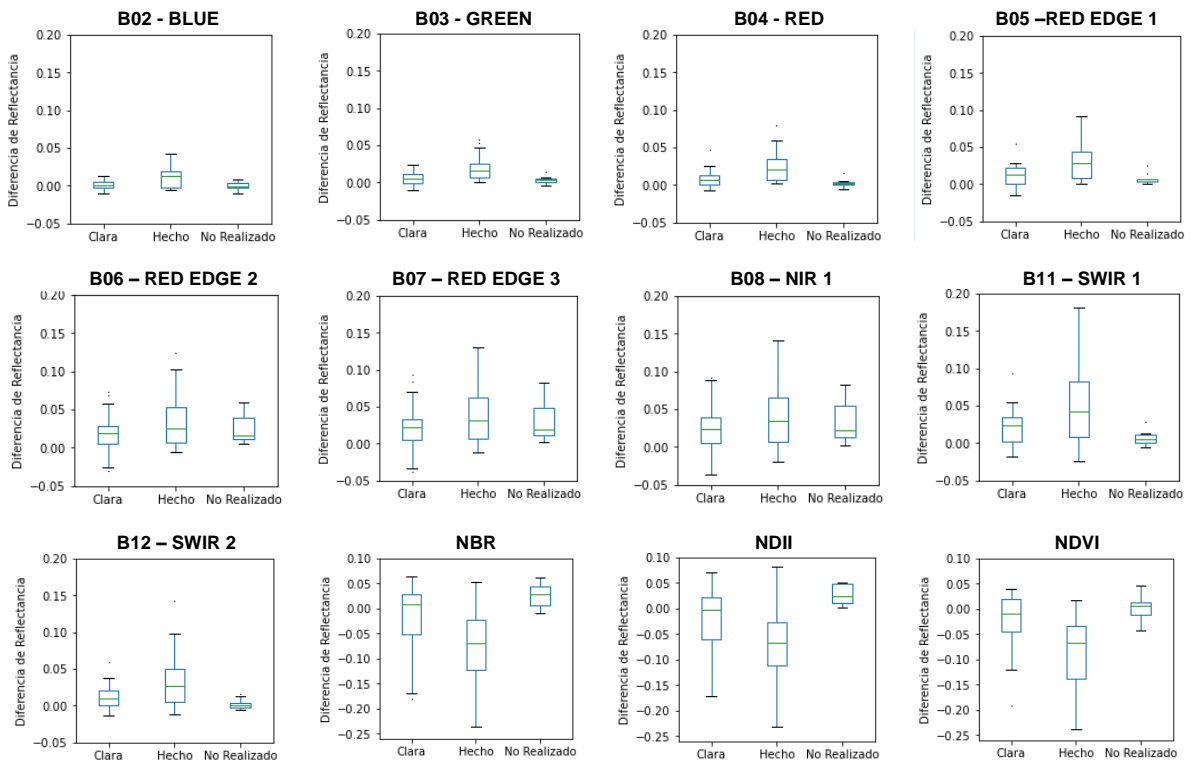


❖ QUERCUS

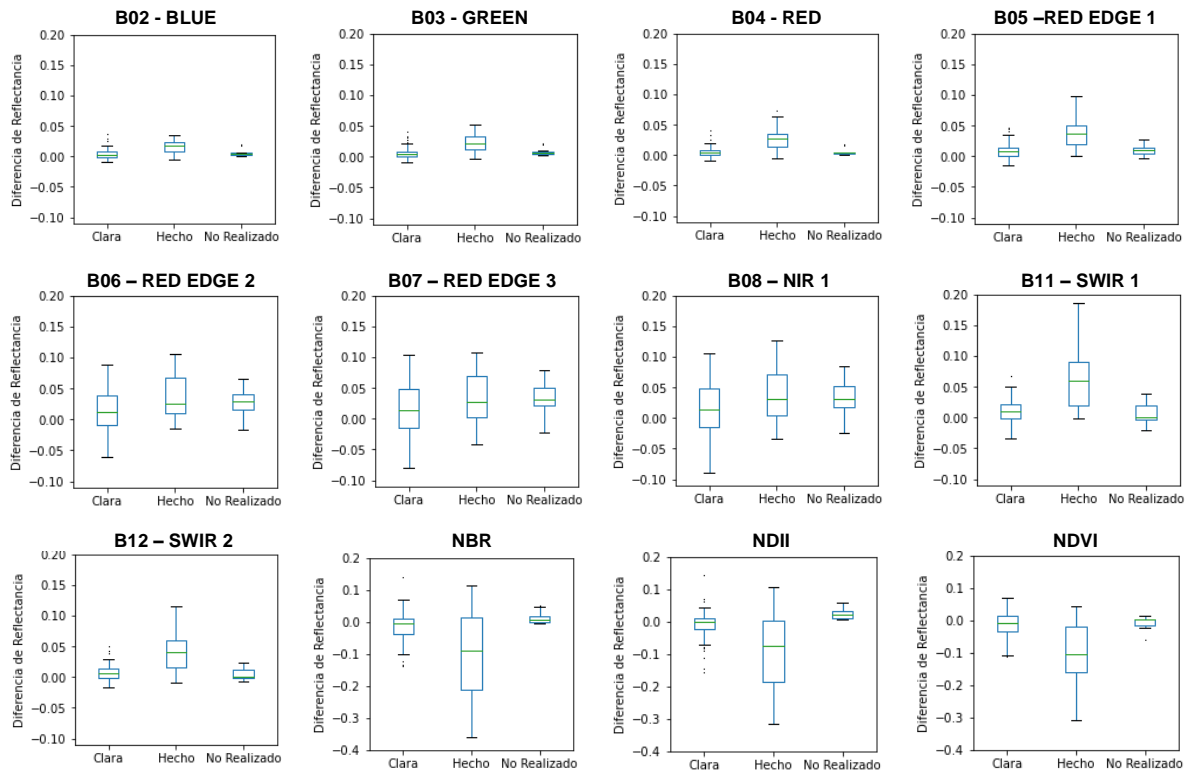


❖ OTRAS FRONDOSAS



❖ PINO LARICIO

❖ PINO SILVESTRE


❖ **OTRAS CONÍFERAS**



1.4. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2017

HAYA 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	2.855	0.240	NO
B03	6.961	0.031	SI
B04	1.532	0.465	NO
B05	5.095	0.078	NO
B06	20.485	0.000	SI
B07	22.037	0.000	SI
B08	20.969	0.000	SI
B11	0.239	0.887	NO
B12	0.153	0.926	NO
NBR	26.078	0.000	SI
NDII	29.099	0.000	SI
NDVI	6.034	0.049	SI

QUERCUS 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	3.593	0.166	NO
B03	2.722	0.256	NO
B04	4.356	0.113	NO
B05	1.944	0.378	NO
B06	4.703	0.095	NO
B07	4.554	0.103	NO
B08	4.361	0.113	NO
B11	1.841	0.398	NO
B12	3.200	0.202	NO
NBR	7.478	0.024	SI
NDII	7.641	0.022	SI
NDVI	7.088	0.029	SI

OTRAS FRONDOSAS 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	14.513	0.001	SI
B03	23.070	0.000	SI
B04	27.137	0.000	SI
B05	28.868	0.000	SI
B06	1.857	0.395	NO
B07	3.958	0.138	NO
B08	2.393	0.302	NO
B11	28.242	0.000	SI
B12	30.363	0.000	SI
NBR	30.645	0.000	SI
NDII	37.657	0.000	SI
NDVI	35.460	0.000	SI

PINO LARICIO 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	11.503	0.003	SI
B03	11.098	0.004	SI
B04	7.909	0.019	SI
B05	12.741	0.002	SI
B06	15.322	0.000	SI
B07	15.856	0.000	SI
B08	16.537	0.000	SI
B11	9.003	0.011	SI
B12	7.105	0.029	SI
NBR	8.631	0.013	SI
NDII	10.131	0.006	SI
NDVI	5.234	0.073	NO

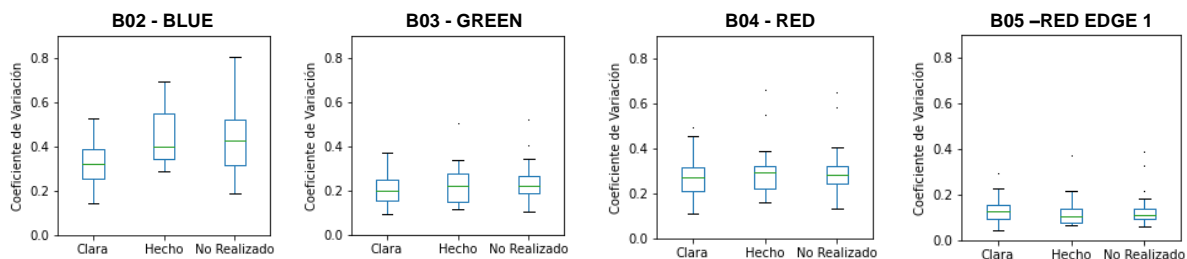
PINO SILVESTRE 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	7.952	0.019	SI
B03	11.446	0.003	SI
B04	12.611	0.002	SI
B05	10.333	0.006	SI
B06	3.100	0.212	NO
B07	1.870	0.393	NO
B08	1.913	0.384	NO
B11	7.523	0.023	SI
B12	11.472	0.003	SI
NBR	14.358	0.001	SI
NDII	12.192	0.002	SI
NDVI	12.429	0.002	SI

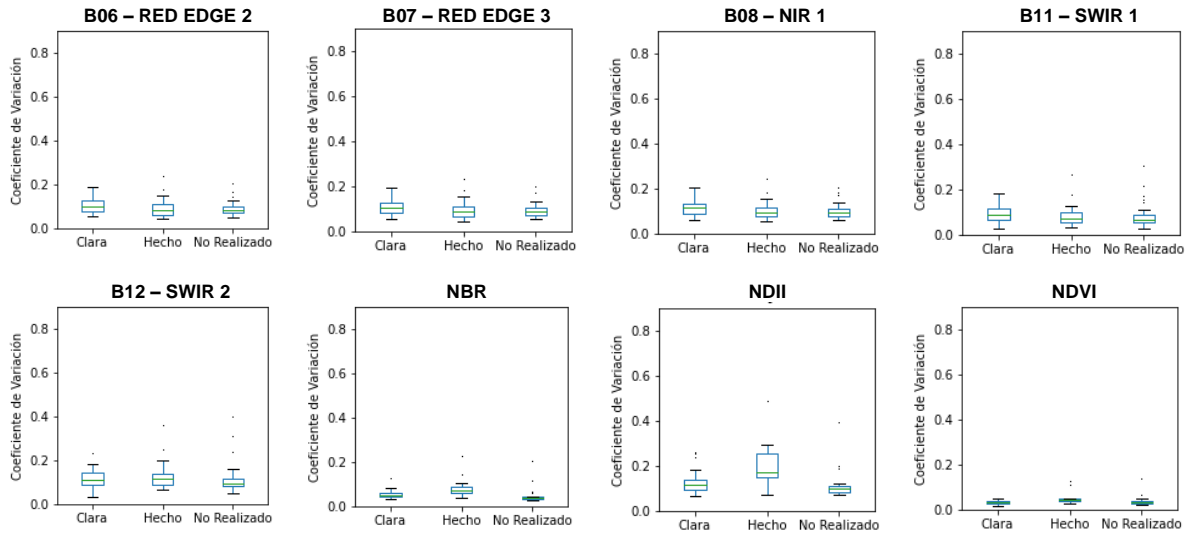
OTRAS CONÍFERAS 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	6.333	0.042	SI
B03	17.501	0.000	SI
B04	16.238	0.000	SI
B05	29.815	0.000	SI
B06	15.379	0.000	SI
B07	11.790	0.003	SI
B08	14.123	0.001	SI
B11	13.942	0.001	SI
B12	1.385	0.500	NO
NBR	8.367	0.015	SI
NDII	12.928	0.002	SI
NDVI	0.418	0.811	NO

ANEXO 2: ANÁLISIS DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN

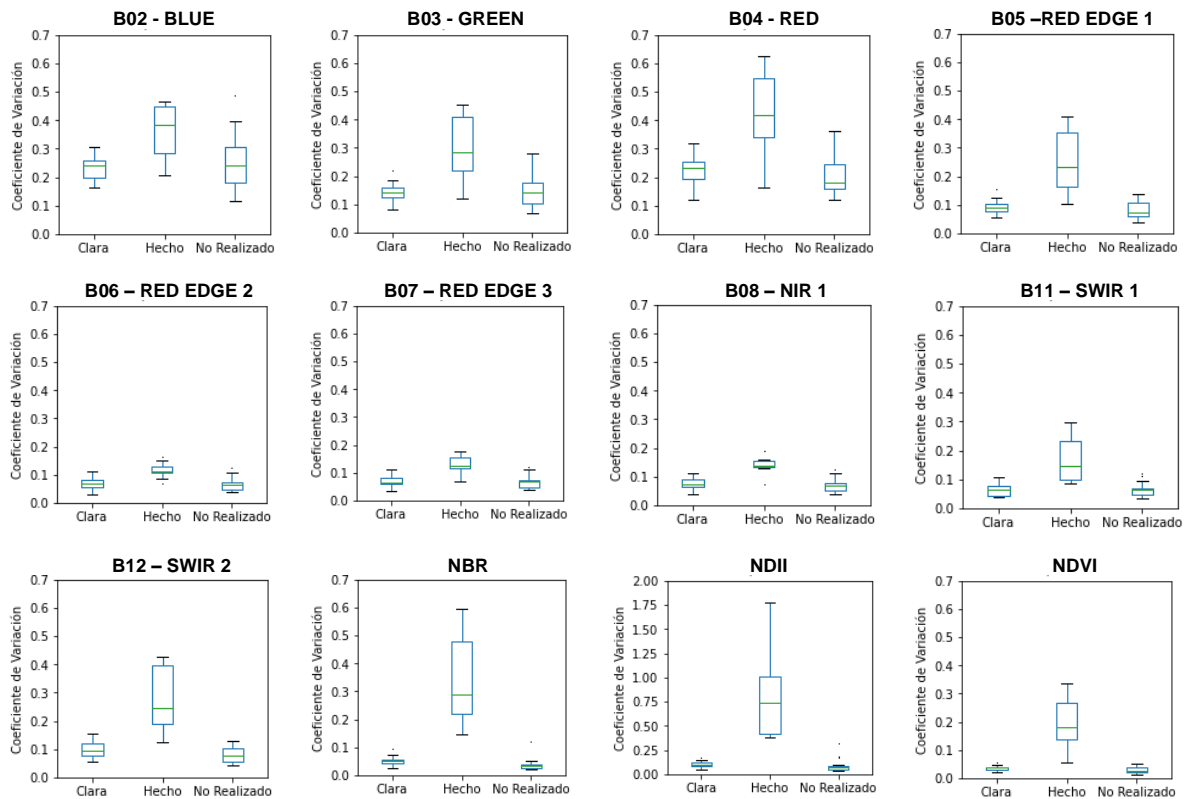
2.1. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2016

❖ HAYA

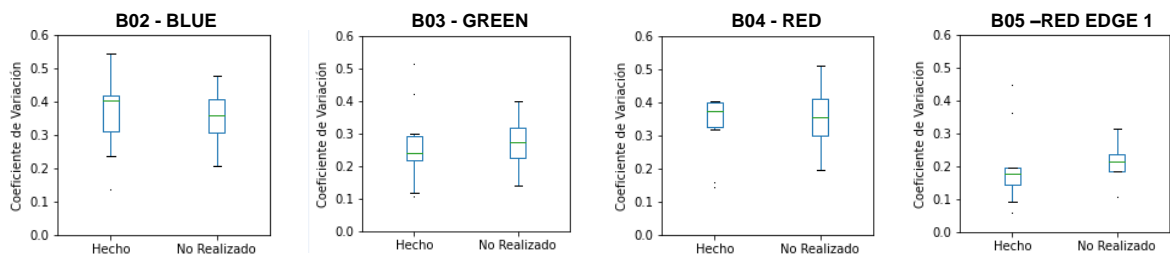


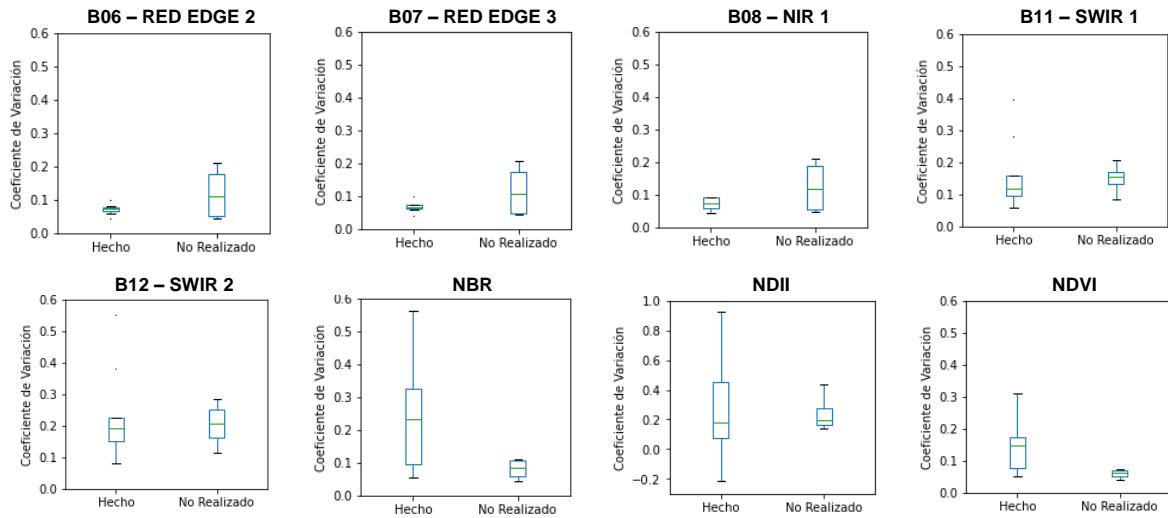
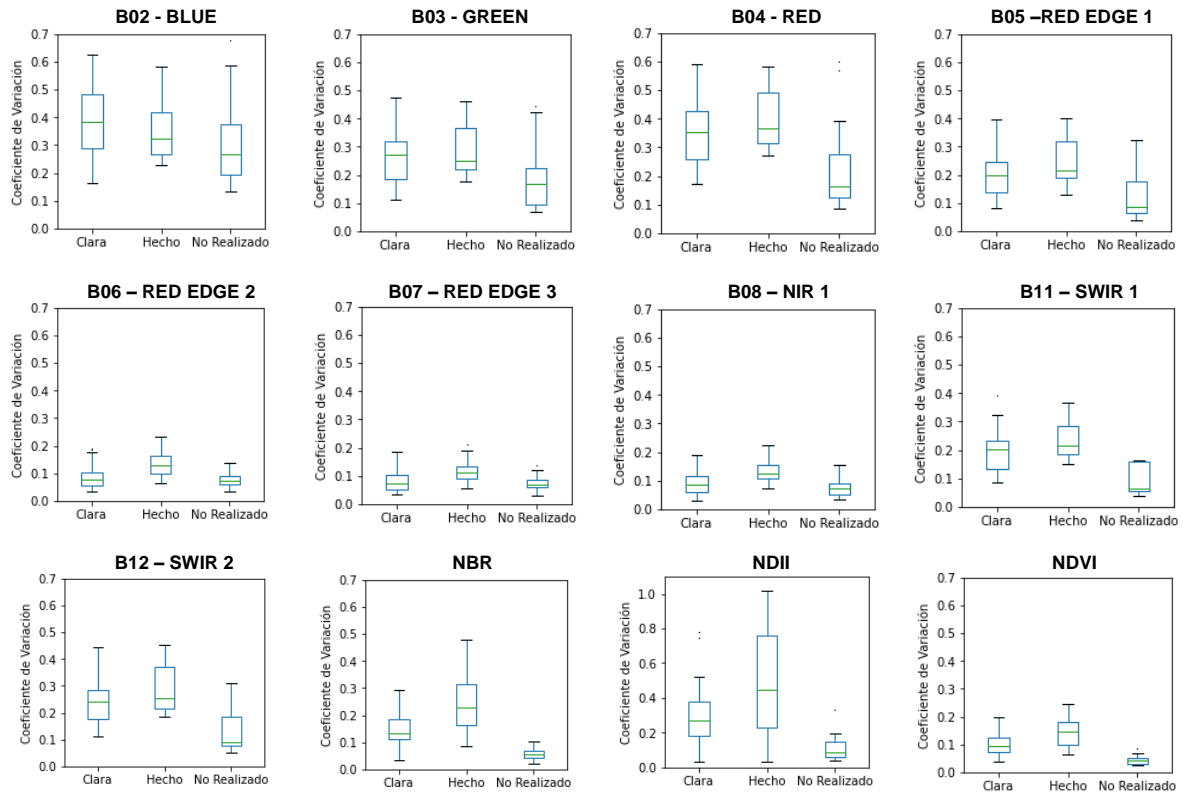
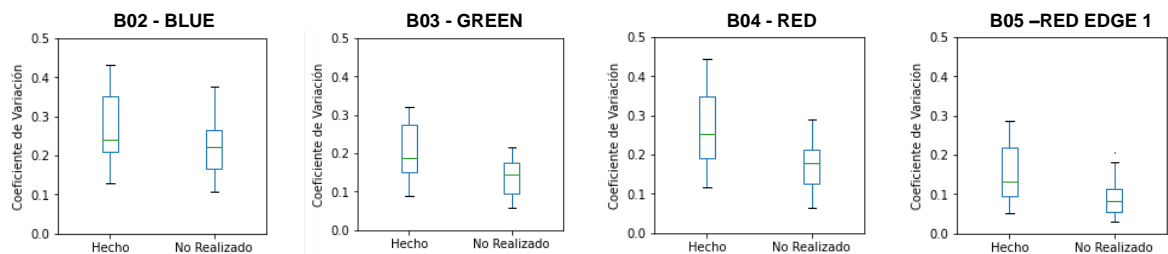


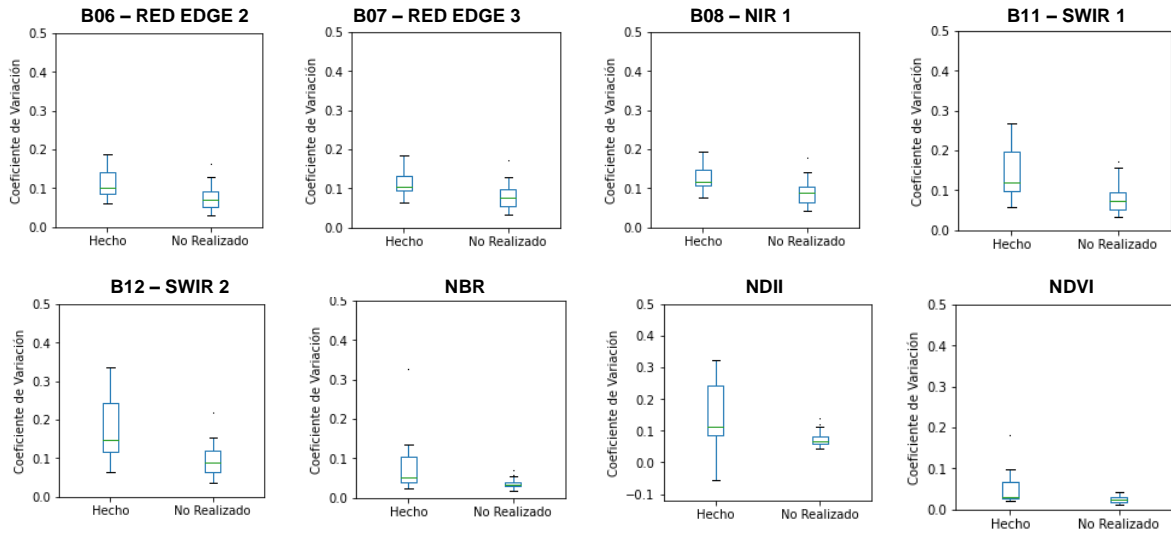
❖ **QUERCUS**



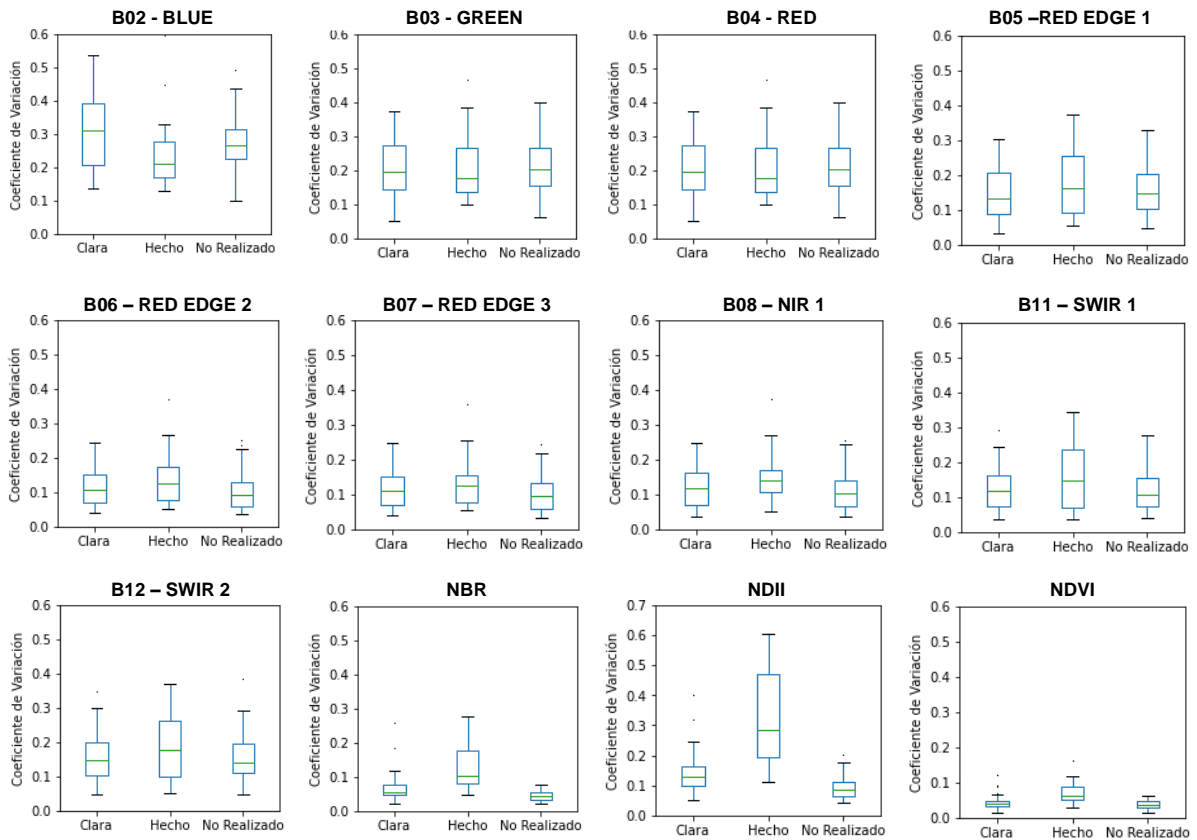
❖ **OTRAS FRONDOSAS**




❖ PINO LARICIO

❖ PINO SILVESTRE




❖ **OTRAS CONÍFERAS**



2.2. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2016

HAYA 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	15.215	0.000	SI
B03	1.892	0.388	NO
B04	1.048	0.592	NO
B05	1.247	0.536	NO
B06	4.736	0.094	NO
B07	4.519	0.104	NO
B08	5.905	0.052	NO
B11	3.934	0.140	NO
B12	2.652	0.266	NO
NBR	27.493	0.000	SI
NDII	23.834	0.000	SI
NDVI	14.062	0.001	SI

QUERCUS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	5.265	0.072	NO
B03	9.587	0.008	SI
B04	13.528	0.001	SI
B05	16.103	0.000	SI
B06	9.655	0.008	SI
B07	8.689	0.013	SI
B08	11.491	0.003	SI
B11	25.202	0.000	SI
B12	20.619	0.000	SI
NBR	34.644	0.000	SI
NDII	21.713	0.000	SI
NDVI	34.040	0.000	SI

OTRAS FRONDOSAS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	2.715	0.257	NO
B03	3.251	0.197	NO
B04	5.403	0.067	NO
B05	3.955	0.138	NO
B06	1.308	0.520	NO
B07	0.755	0.686	NO
B08	0.579	0.749	NO
B11	4.127	0.127	NO
B12	6.677	0.035	SI
NBR	1.745	0.418	NO
NDII	0.379	0.827	NO
NDVI	7.956	0.019	SI

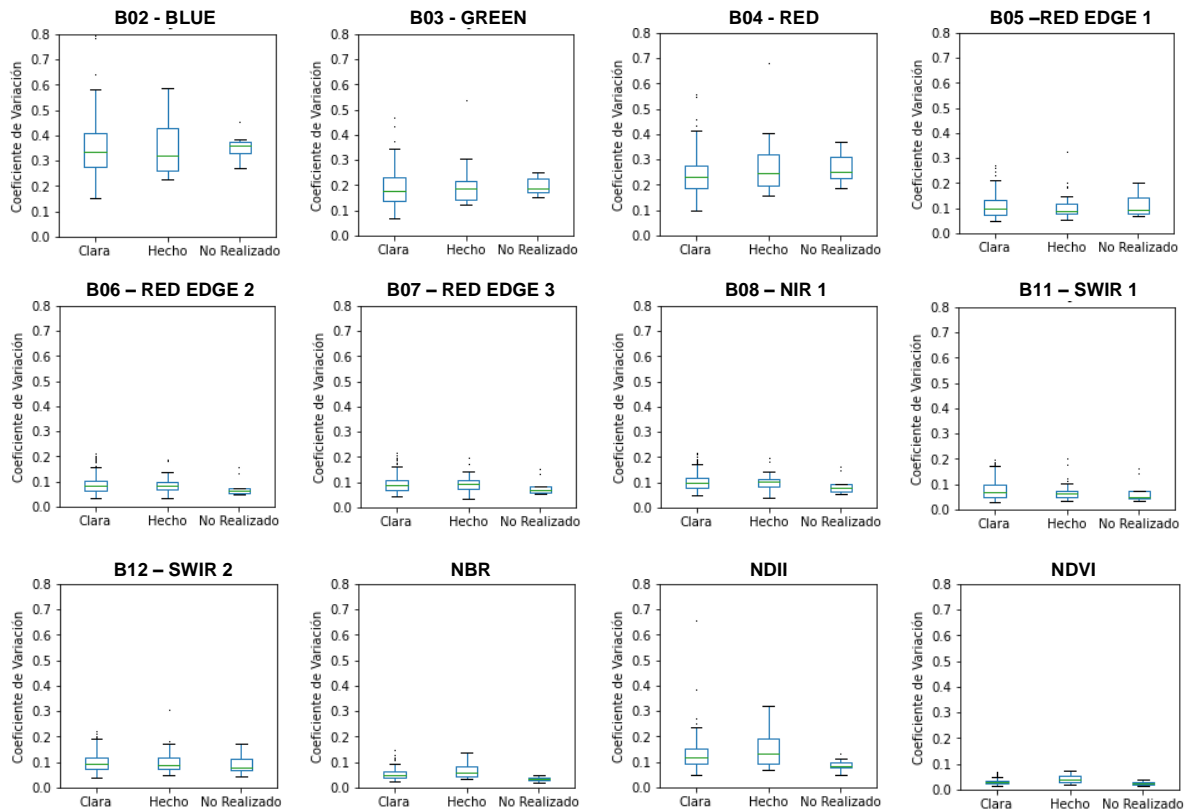
PINO LARICIO 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	5.265	0.072	NO
B03	9.587	0.008	SI
B04	13.528	0.001	SI
B05	16.103	0.000	SI
B06	9.655	0.008	SI
B07	8.689	0.013	SI
B08	11.491	0.003	SI
B11	25.202	0.000	SI
B12	20.619	0.000	SI
NBR	34.644	0.000	SI
NDII	21.713	0.000	SI
NDVI	34.040	0.000	SI

PINO SILVESTRE 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	3.766	0.052	NO
B03	8.706	0.003	SI
B04	12.010	0.001	SI
B05	10.039	0.002	SI
B06	14.008	0.000	SI
B07	14.008	0.000	SI
B08	17.130	0.000	SI
B11	15.530	0.000	SI
B12	14.008	0.000	SI
NBR	14.306	0.000	SI
NDII	14.759	0.000	SI
NDVI	14.759	0.000	SI

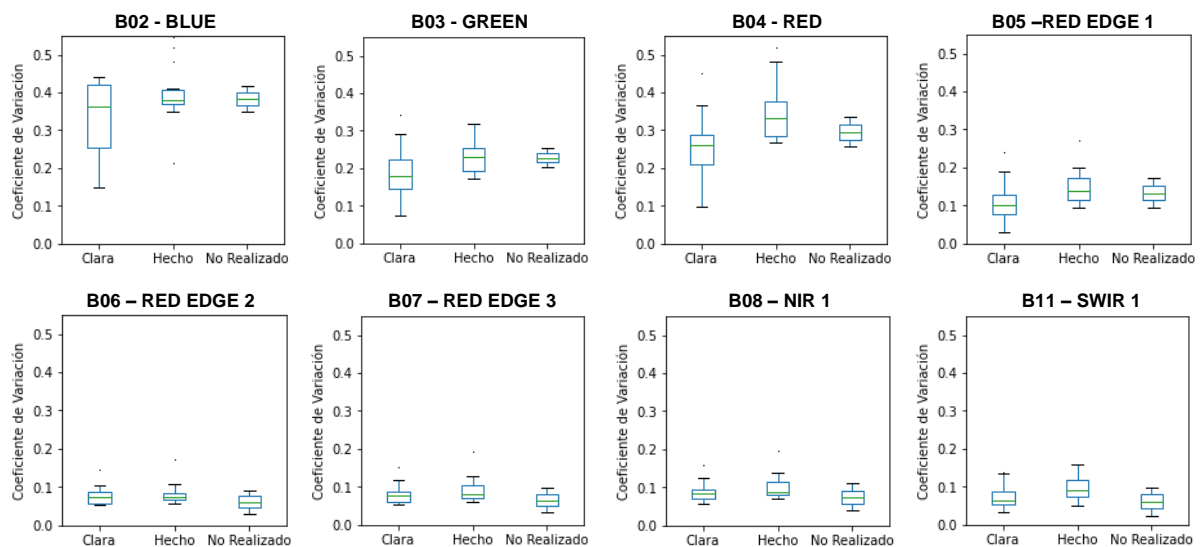
OTRAS CONÍFERAS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	5.265	0.072	NO
B03	9.587	0.008	SI
B04	13.528	0.001	SI
B05	16.103	0.000	SI
B06	9.655	0.008	SI
B07	8.689	0.013	SI
B08	11.491	0.003	SI
B11	25.202	0.000	SI
B12	20.619	0.000	SI
NBR	34.644	0.000	SI
NDII	21.713	0.000	SI
NDVI	34.040	0.000	SI

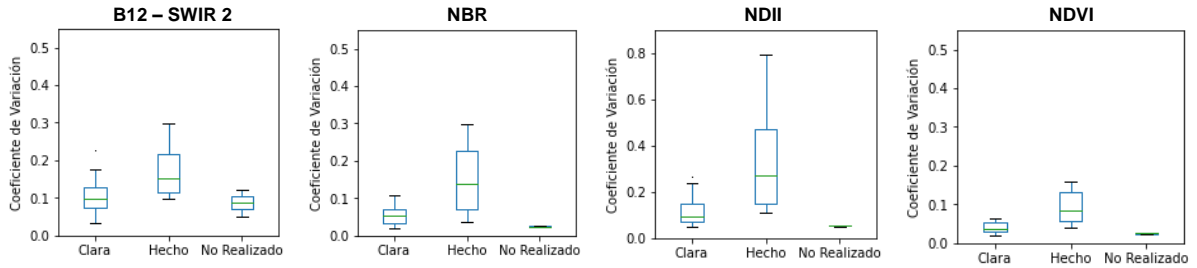
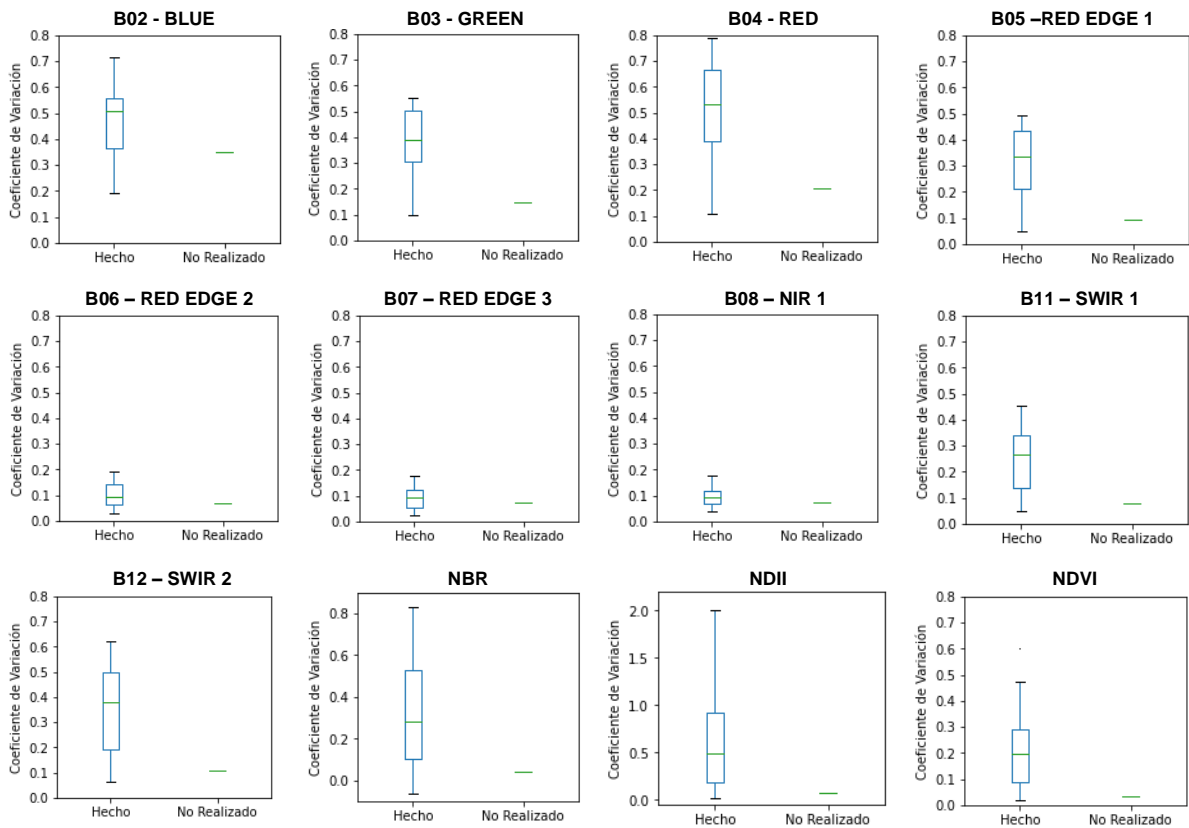
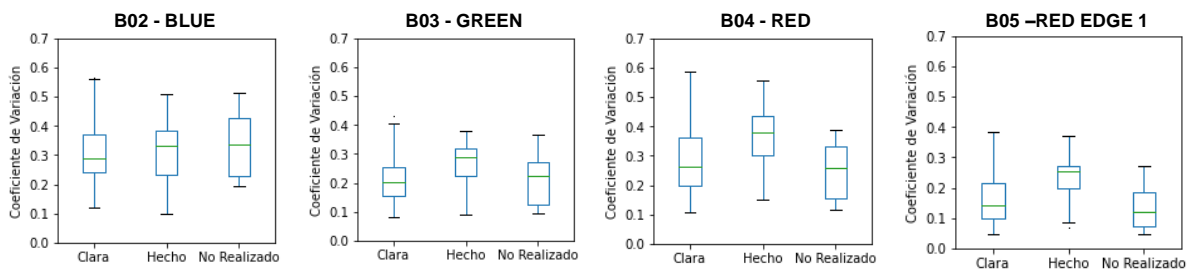
2.3. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2017

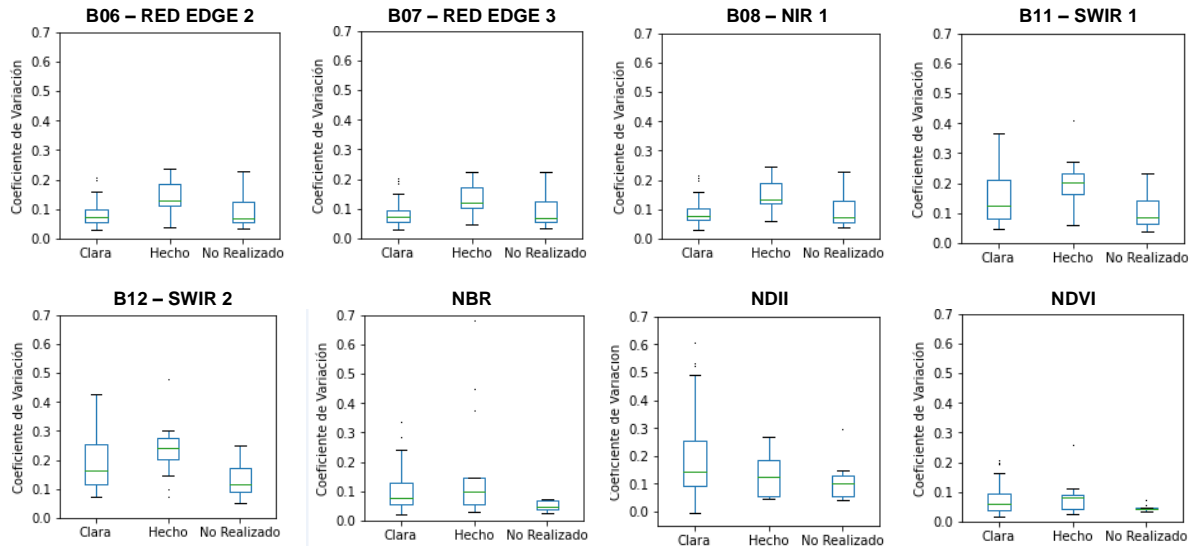
❖ HAYA



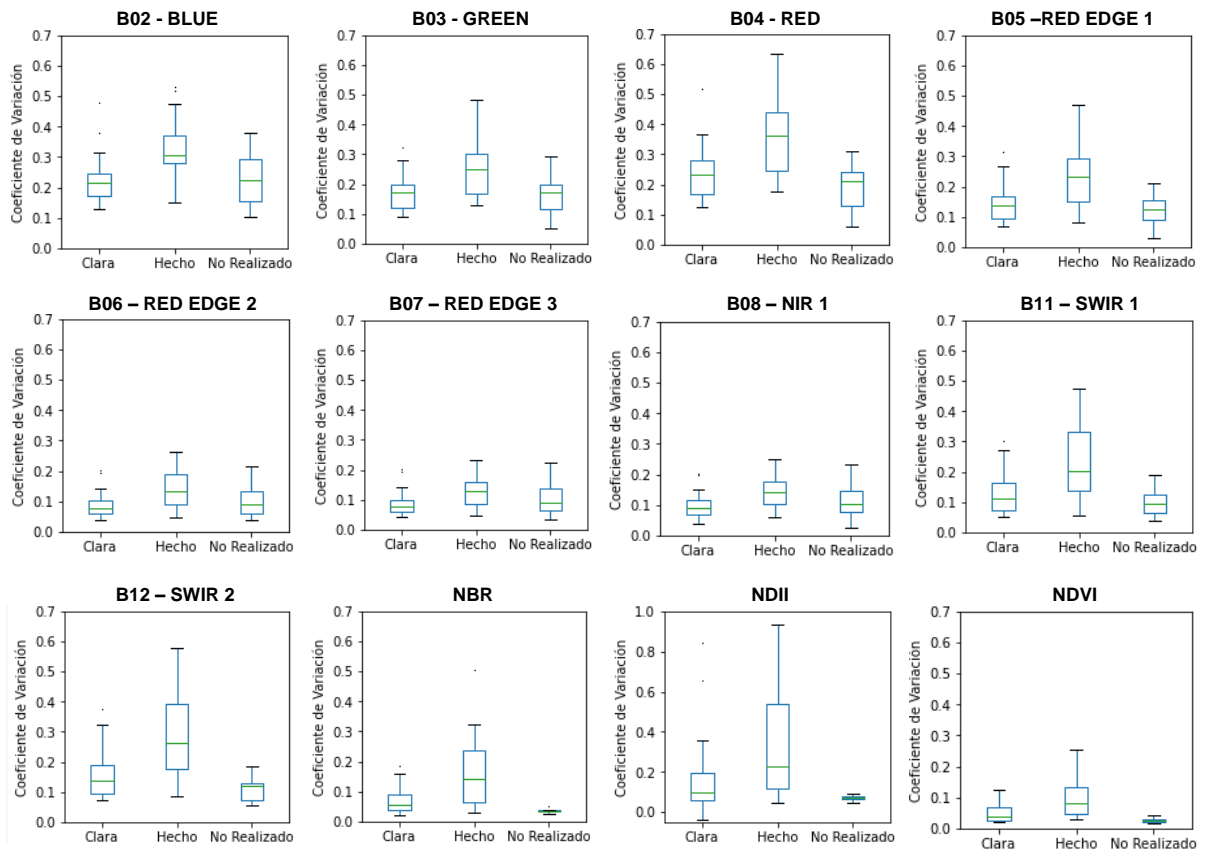
❖ QUERCUS



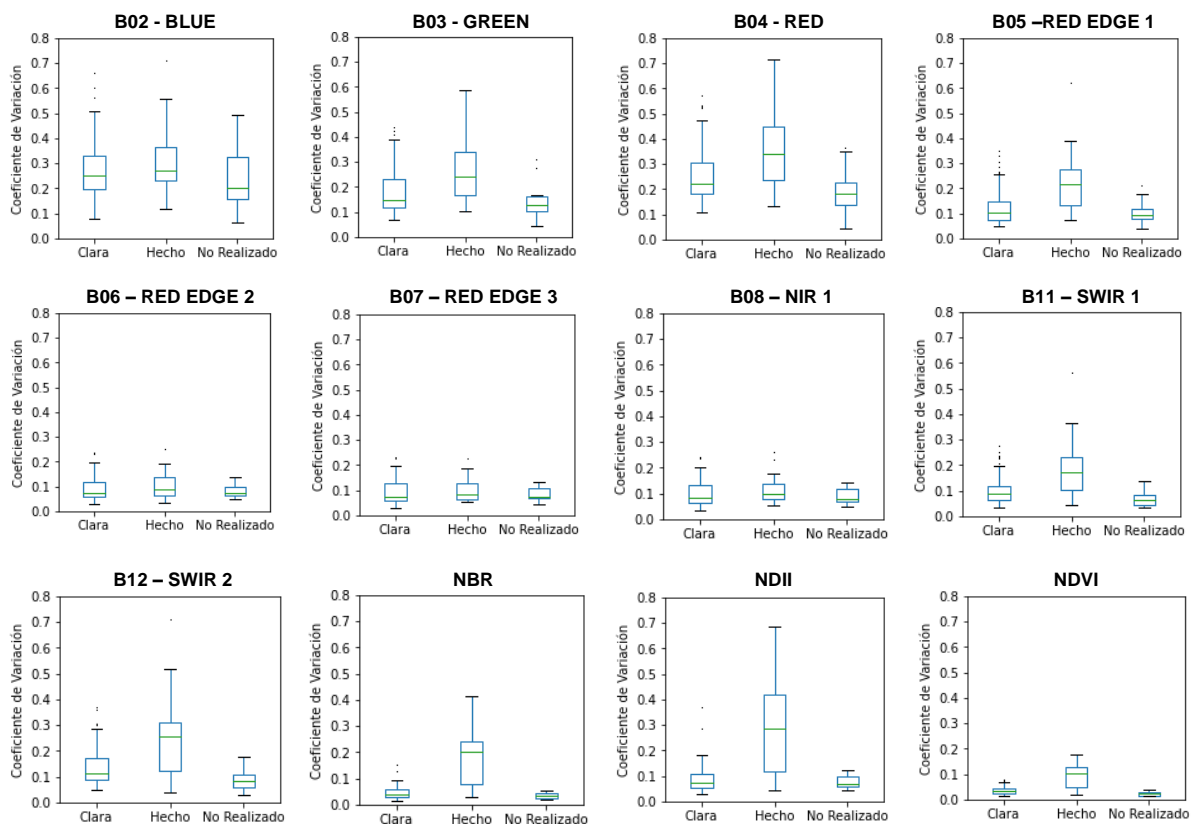

❖ OTRAS FRONDOSAS

❖ PINO LARICIO




❖ PINO SILVESTRE



❖ OTRAS CONÍFERAS



2.4. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2017

HAYA 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	0.515	0.773	NO
B03	1.270	0.530	NO
B04	5.942	0.051	NO
B05	0.520	0.771	NO
B06	3.111	0.211	NO
B07	2.865	0.239	NO
B08	2.372	0.305	NO
B11	3.326	0.190	NO
B12	0.384	0.826	NO
NBR	20.506	0.000	SI
NDII	14.263	0.001	SI
NDVI	26.698	0.000	SI

QUERCUS 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	1.936	0.380	NO
B03	4.497	0.106	NO
B04	9.698	0.008	SI
B05	6.047	0.049	SI
B06	0.689	0.708	NO
B07	1.710	0.425	NO
B08	1.906	0.385	NO
B11	5.584	0.061	NO
B12	9.339	0.009	SI
NBR	15.260	0.000	SI
NDII	15.295	0.000	SI
NDVI	18.852	0.000	SI

OTRAS FRONDOSAS 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	25.946	0.000	SI
B03	40.232	0.000	SI
B04	41.746	0.000	SI
B05	45.990	0.000	SI
B06	2.161	0.339	NO
B07	0.883	0.643	NO
B08	1.498	0.473	NO
B11	38.775	0.000	SI
B12	41.635	0.000	SI
NBR	59.378	0.000	SI
NDII	47.950	0.000	SI
NDVI	64.085	0.000	SI

PINO LARICIO 2017			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	0.942	0.624	NO
B03	7.716	0.021	SI
B04	7.134	0.028	SI
B05	13.617	0.001	SI
B06	13.020	0.001	SI
B07	13.247	0.001	SI
B08	15.220	0.000	SI
B11	8.083	0.018	SI
B12	7.761	0.021	SI
NBR	7.973	0.019	SI
NDII	5.016	0.081	NO
NDVI	3.078	0.215	NO

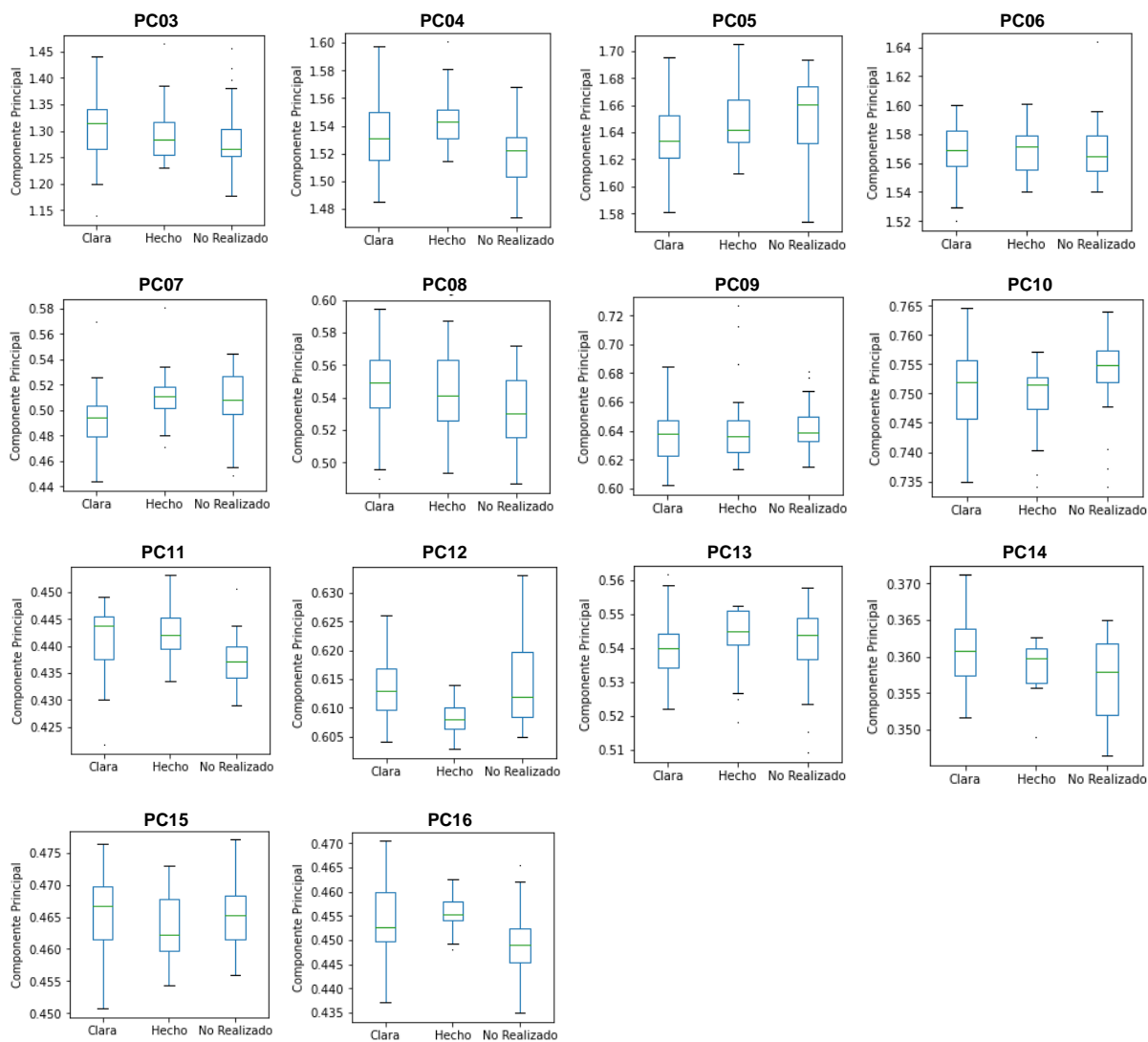
PINO SILVESTRE 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	10.990	0.004	SI
B03	9.638	0.008	SI
B04	16.213	0.000	SI
B05	12.465	0.002	SI
B06	9.595	0.008	SI
B07	8.664	0.013	SI
B08	9.779	0.008	SI
B11	11.068	0.004	SI
B12	15.053	0.001	SI
NBR	16.317	0.000	SI
NDII	11.727	0.003	SI
NDVI	19.573	0.000	SI

OTRAS CONÍFERAS 2016			
Banda	Estadístico H	p-value	Significativo
B02	1.988	0.370	NO
B03	16.749	0.000	SI
B04	13.107	0.001	SI
B05	33.696	0.000	SI
B06	17.796	0.000	SI
B07	16.205	0.000	SI
B08	19.880	0.000	SI
B11	33.800	0.000	SI
B12	25.821	0.000	SI
NBR	44.500	0.000	SI
NDII	0.799	0.671	NO
NDVI	45.803	0.000	SI

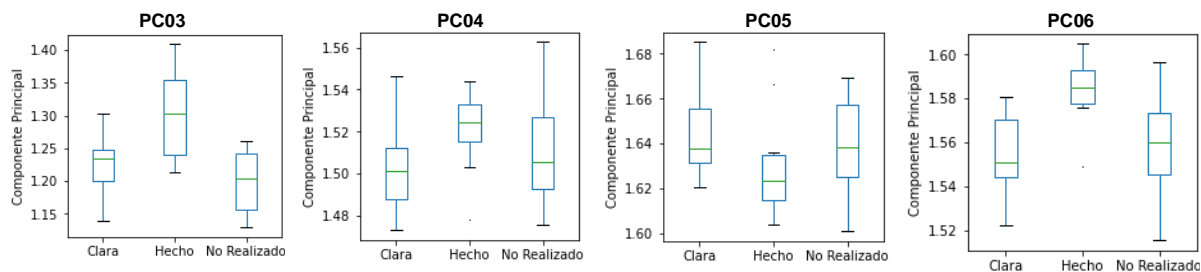
ANEXO 3: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

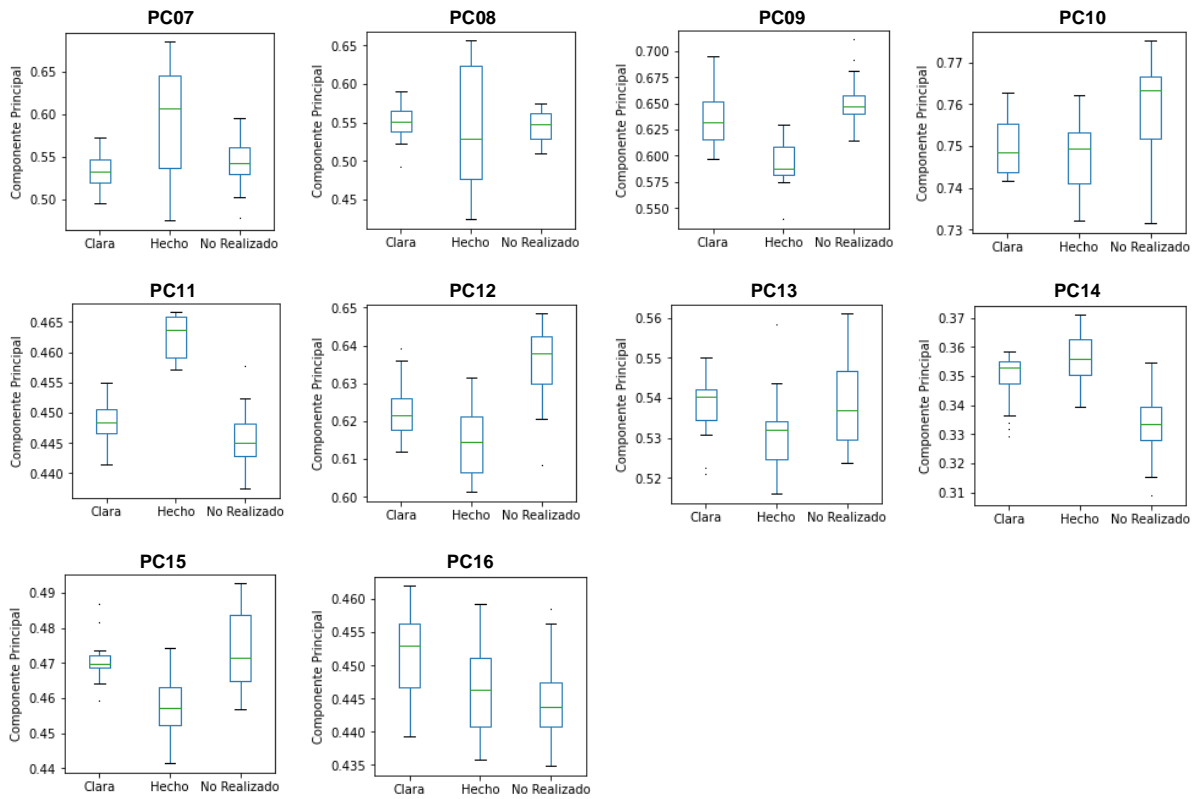
3.1. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2016

❖ HAYA

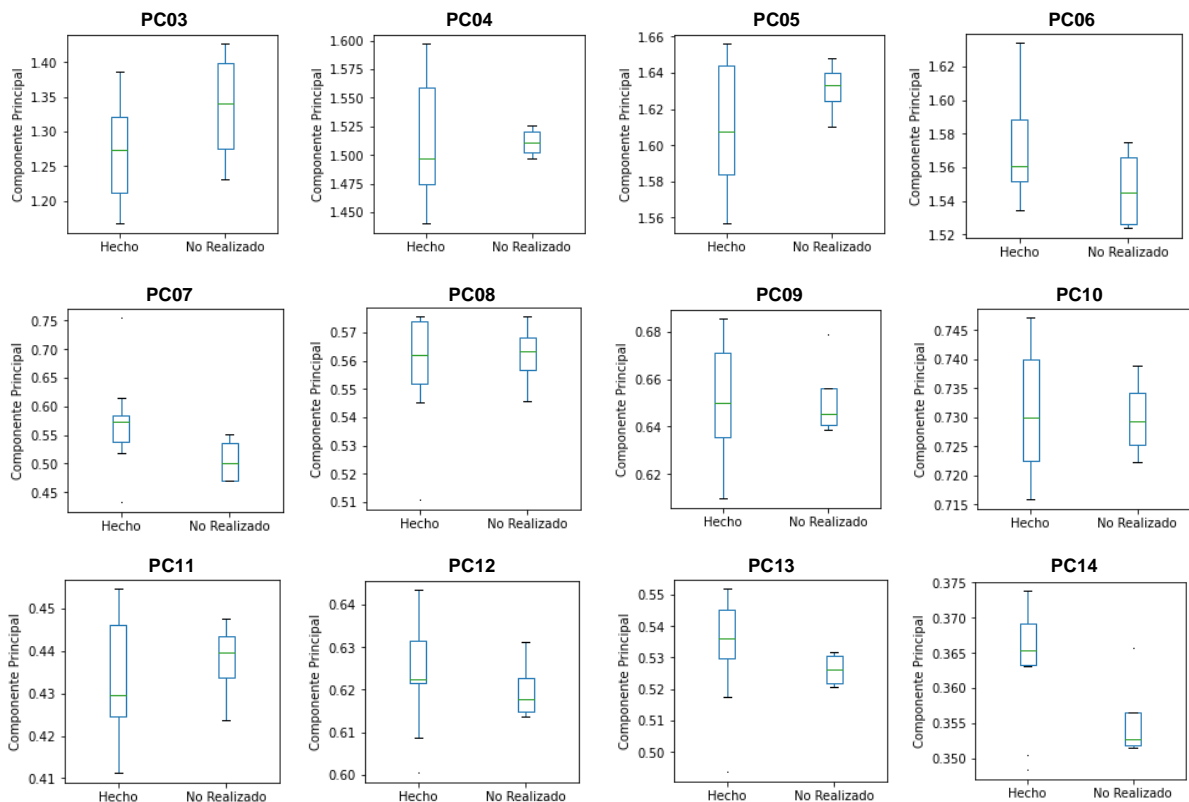


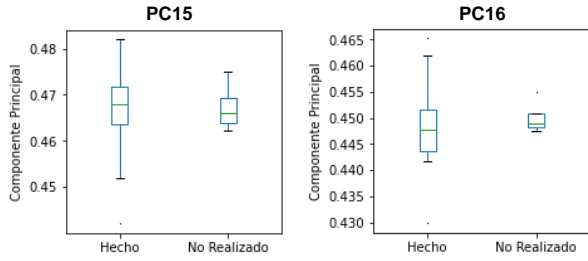
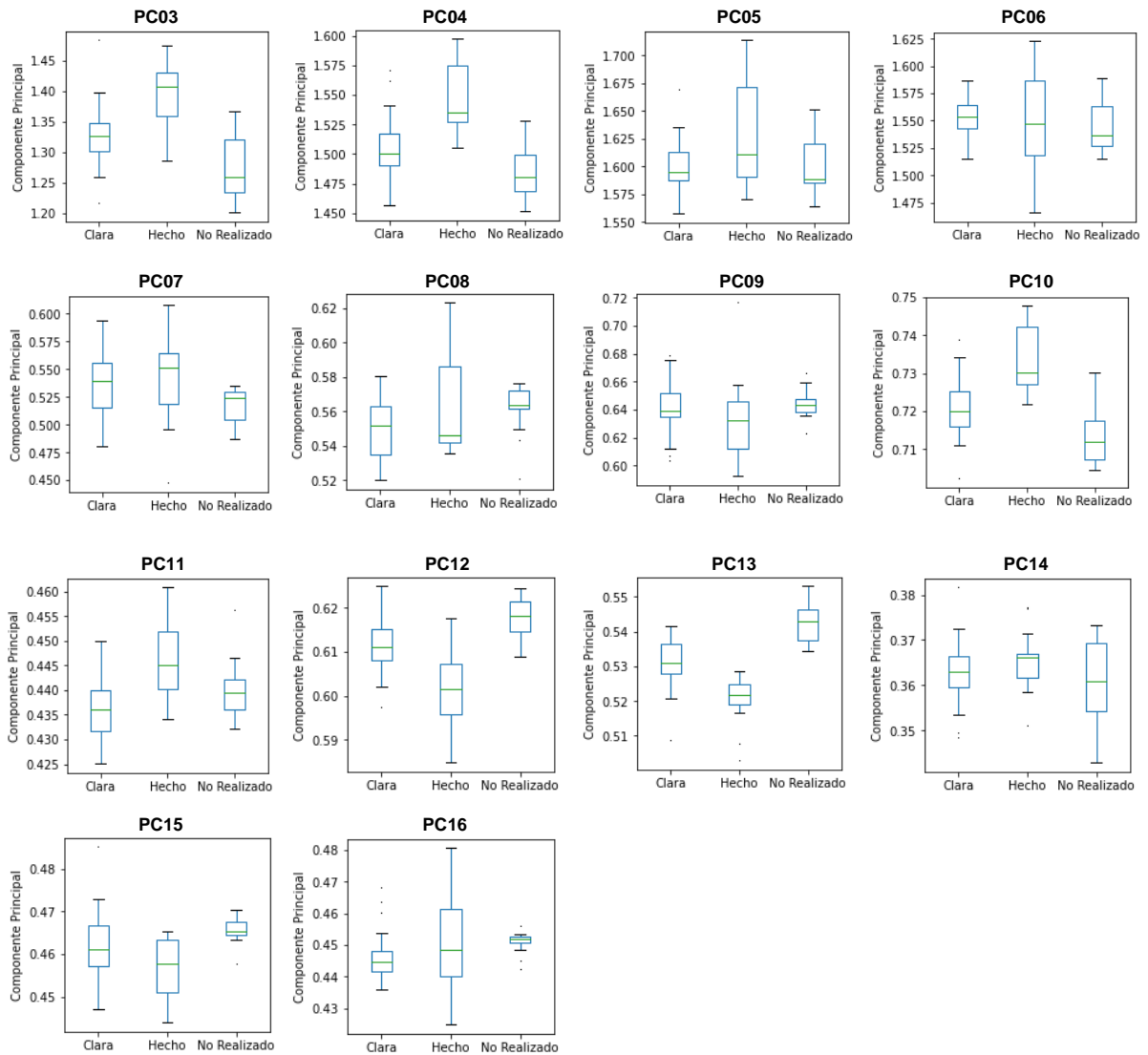
❖ QUERCUS



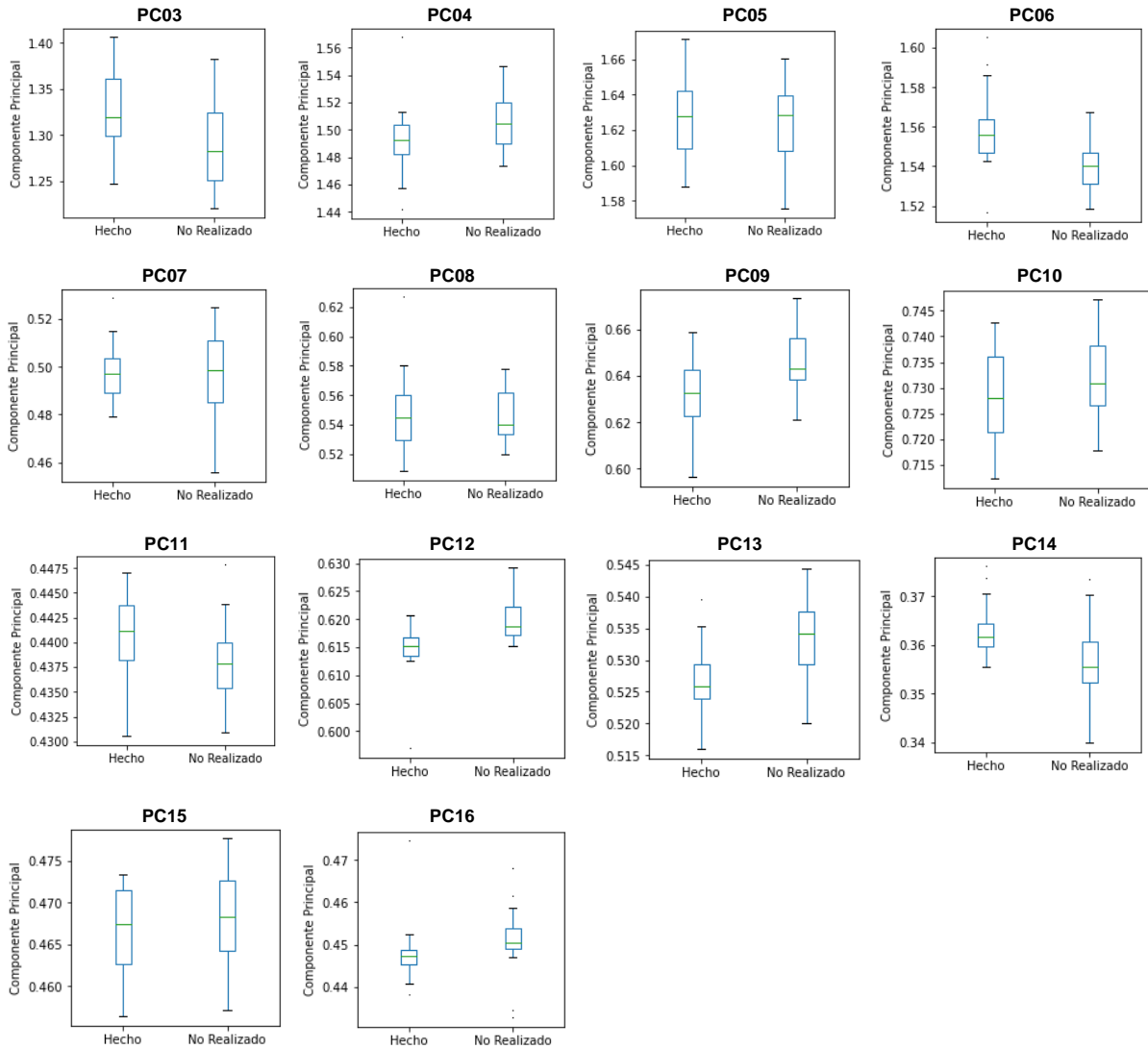


❖ **OTRAS FRONDOSAS**

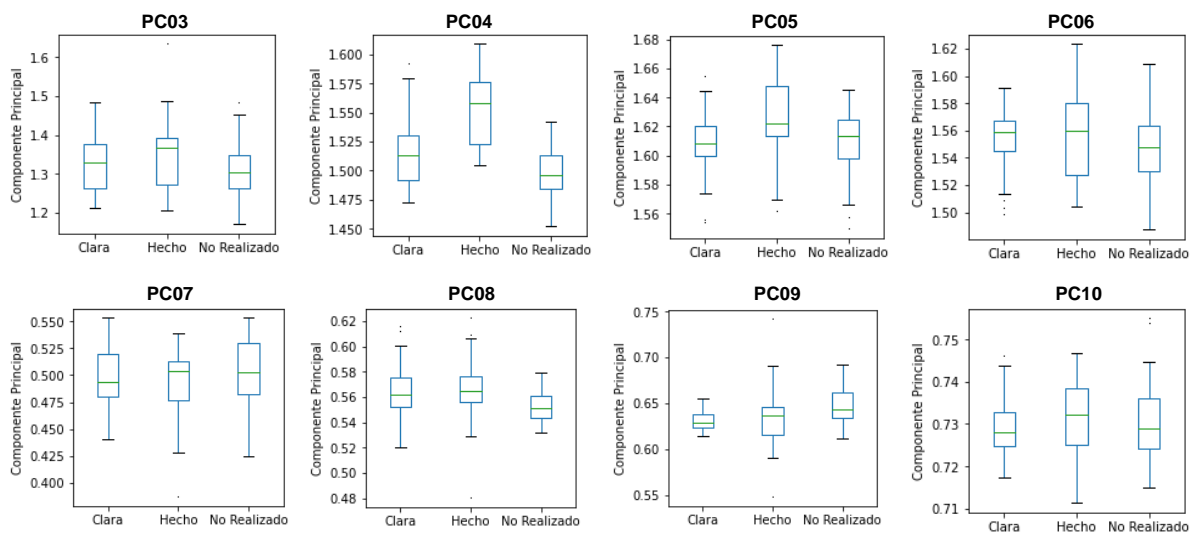


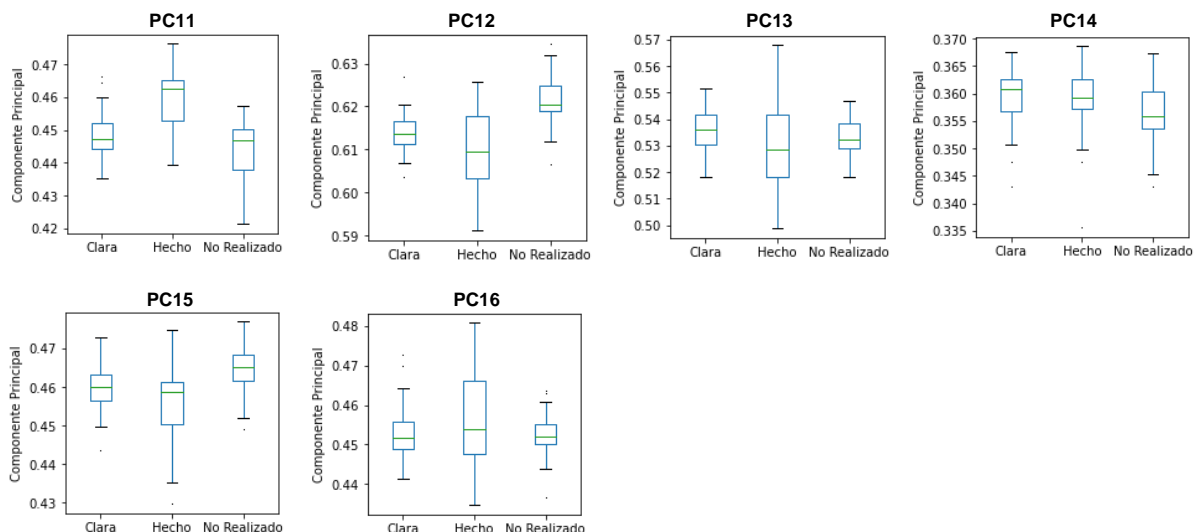

❖ PINO LARICIO


❖ **PINO SILVESTRE**



❖ **OTRAS CONÍFERAS**





3.2. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2016

HAYA 2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	5.807	0.055	NO
04	11.367	0.003	SI
05	10.632	0.005	SI
06	0.476	0.788	NO
07	11.068	0.004	SI
08	7.093	0.029	SI
09	2.387	0.303	NO
10	7.613	0.022	SI
11	16.853	0.000	SI
12	13.078	0.001	SI
13	4.820	0.090	NO
14	6.018	0.049	SI
15	2.815	0.245	NO
16	11.510	0.003	SI

QUERCUS 2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	5.807	0.055	NO
04	11.367	0.003	SI
05	10.632	0.005	SI
06	0.476	0.788	NO
07	11.068	0.004	SI
08	7.093	0.029	SI
09	2.387	0.303	NO
10	7.613	0.022	SI
11	16.853	0.000	SI
12	13.078	0.001	SI
13	4.820	0.090	NO
14	6.018	0.049	SI
15	2.815	0.245	NO
16	11.510	0.003	SI

OTRAS FRONDOSAS 2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	0.698	0.705	NO
04	1.546	0.462	NO
05	0.599	0.741	NO
06	2.214	0.331	NO
07	0.592	0.744	NO
08	13.088	0.001	SI

PINO LARICIO 2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	23.137	0.000	SI
04	27.048	0.000	SI
05	4.068	0.131	NO
06	2.408	0.300	NO
07	7.799	0.020	SI
08	5.921	0.052	NO

09	0.395	0.821	NO
10	2.424	0.298	NO
11	0.254	0.881	NO
12	4.116	0.128	NO
13	3.087	0.214	NO
14	3.102	0.212	NO
15	2.803	0.246	NO
16	1.489	0.475	NO

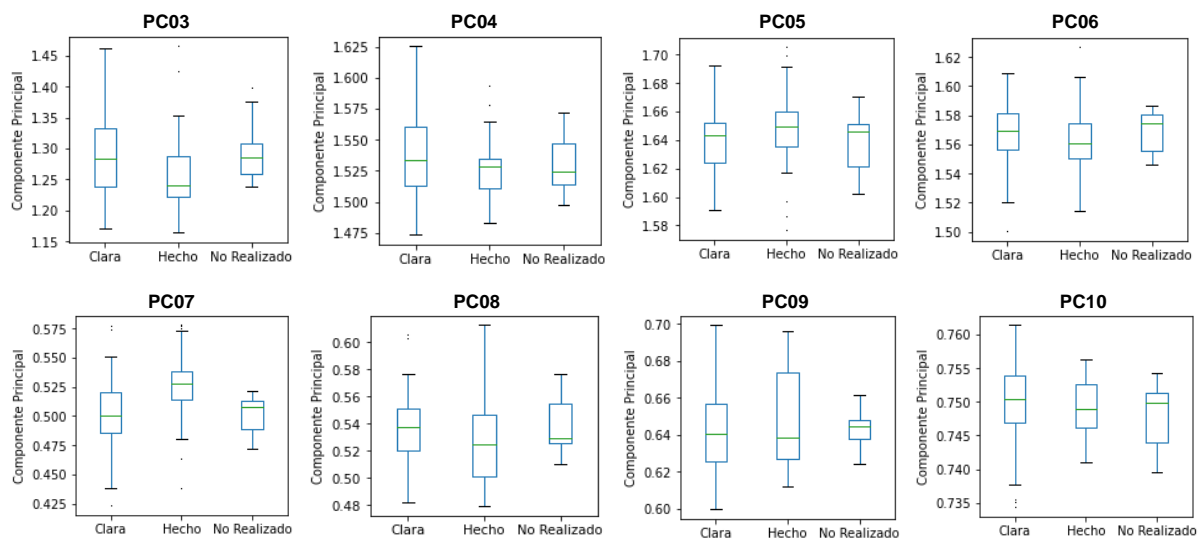
09	3.798	0.150	NO
10	28.683	0.000	SI
11	16.492	0.000	SI
12	28.728	0.000	SI
13	39.756	0.000	SI
14	2.681	0.262	NO
15	14.167	0.001	SI
16	11.901	0.003	SI

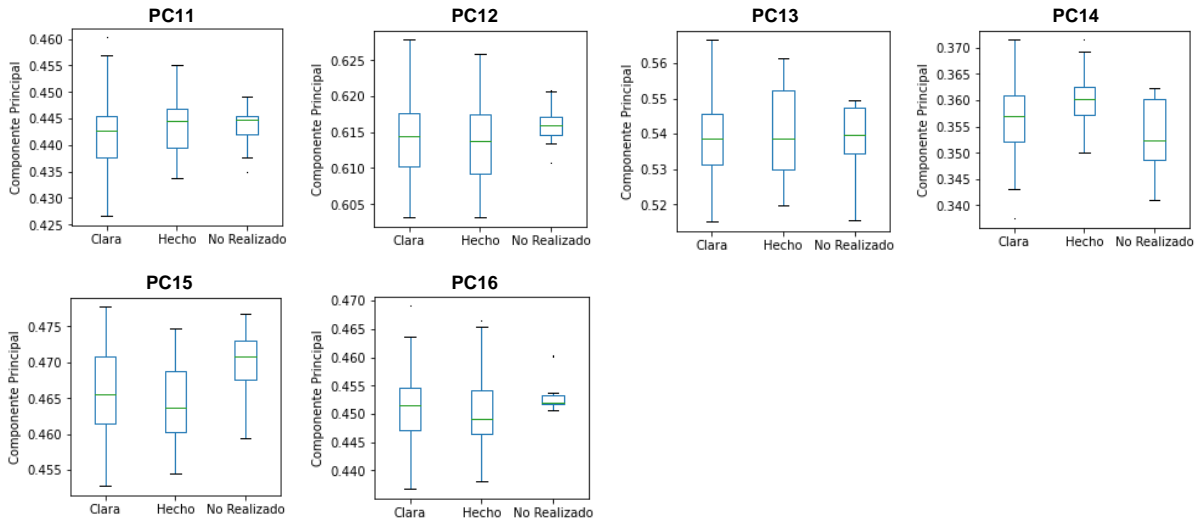
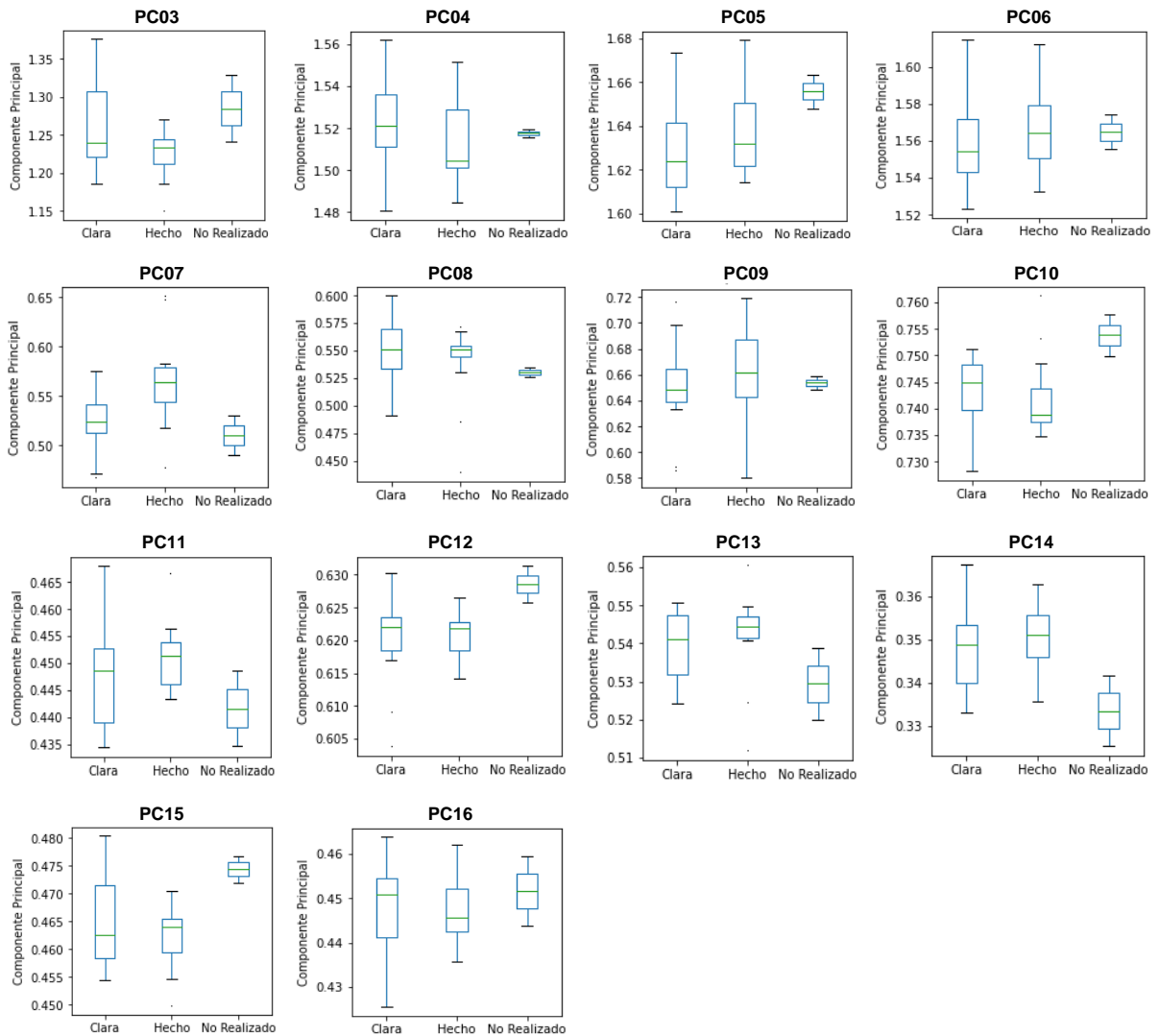
PINO SILVESTRE 2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	6.325	0.012	SI
04	5.277	0.022	SI
05	0.353	0.552	NO
06	14.607	0.000	SI
07	0.039	0.843	NO
08	0.066	0.797	NO
09	9.060	0.003	SI
10	1.274	0.259	NO
11	5.186	0.023	SI
12	18.808	0.000	SI
13	9.544	0.002	SI
14	12.706	0.000	SI
15	1.657	0.198	NO
16	10.547	0.001	SI

OTRAS CONÍFERAS 2016			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	5.116	0.077	NO
04	6.549	0.038	SI
05	6.553	0.038	SI
06	2.856	0.240	NO
07	17.154	0.000	SI
08	0.040	0.980	NO
09	0.190	0.909	NO
10	9.140	0.010	SI
11	1.405	0.495	NO
12	5.530	0.063	NO
13	18.411	0.000	SI
14	10.230	0.006	SI
15	13.334	0.001	SI
16	2.427	0.297	NO

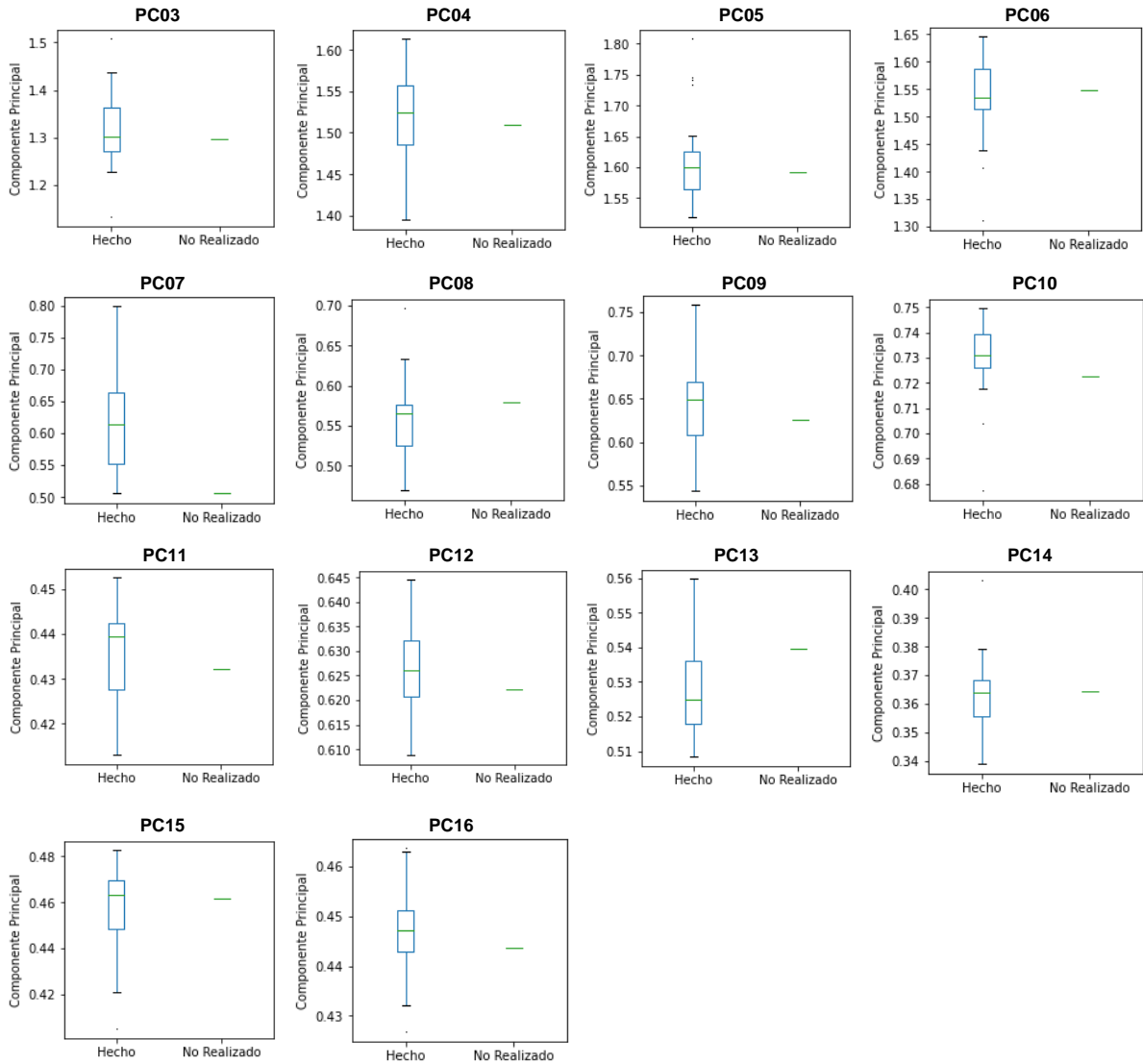
3.3. DIAGRAMAS DE CAJAS PERIODO 2017

❖ HAYA

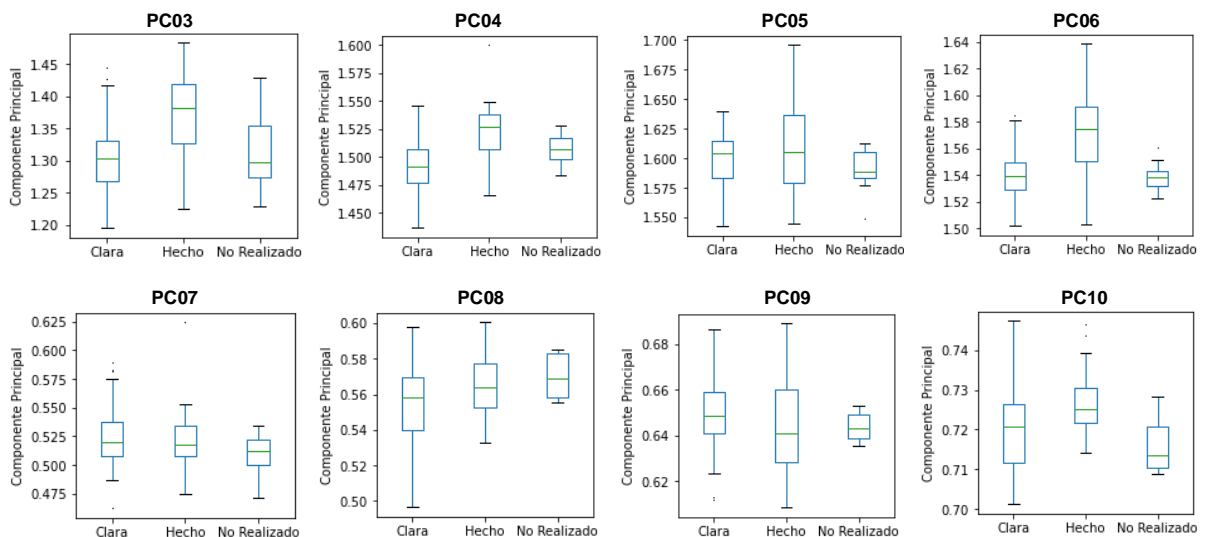


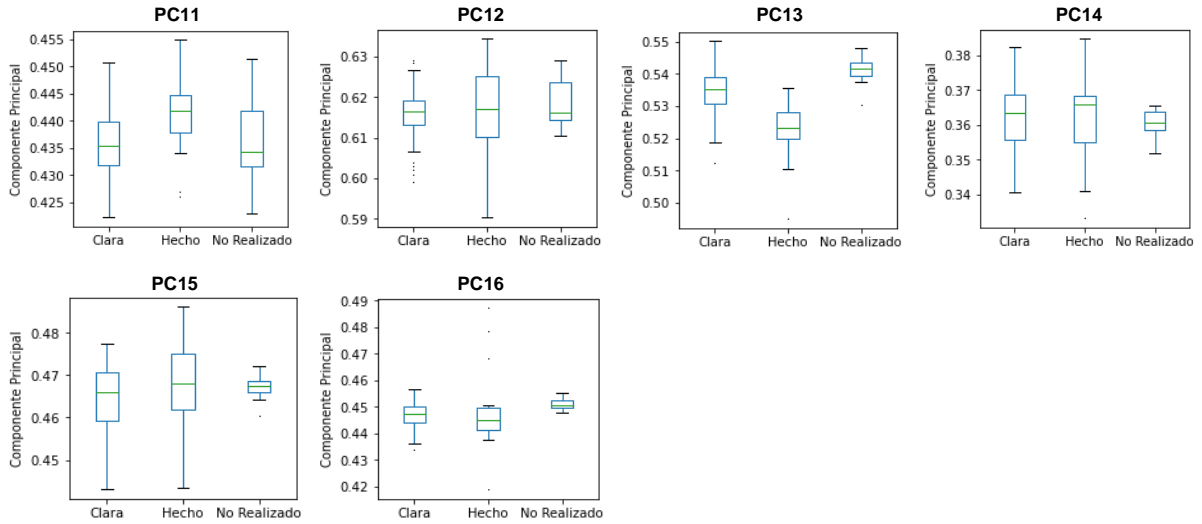
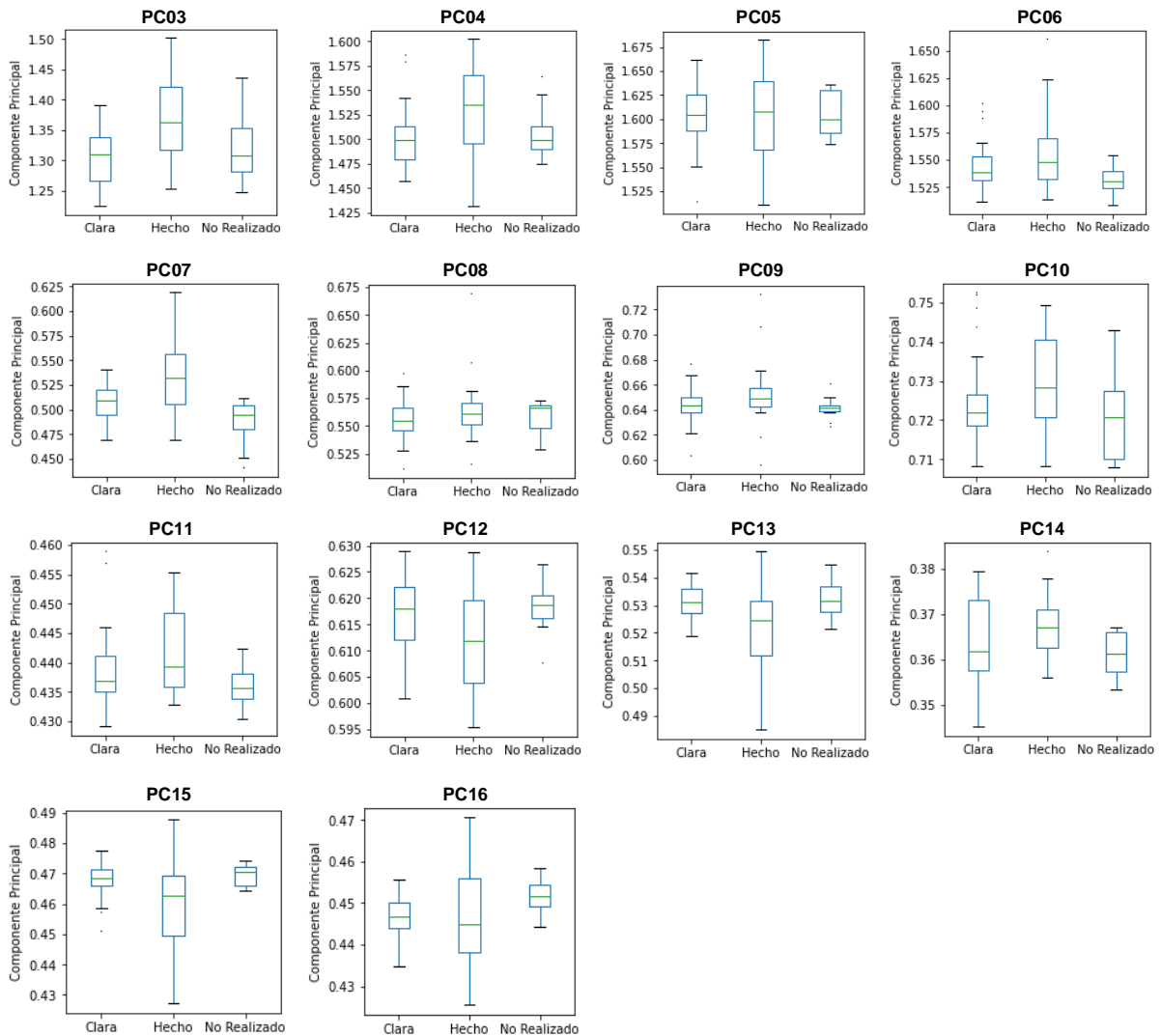

❖ QUERCUS


❖ **OTRAS FRONDOSAS**

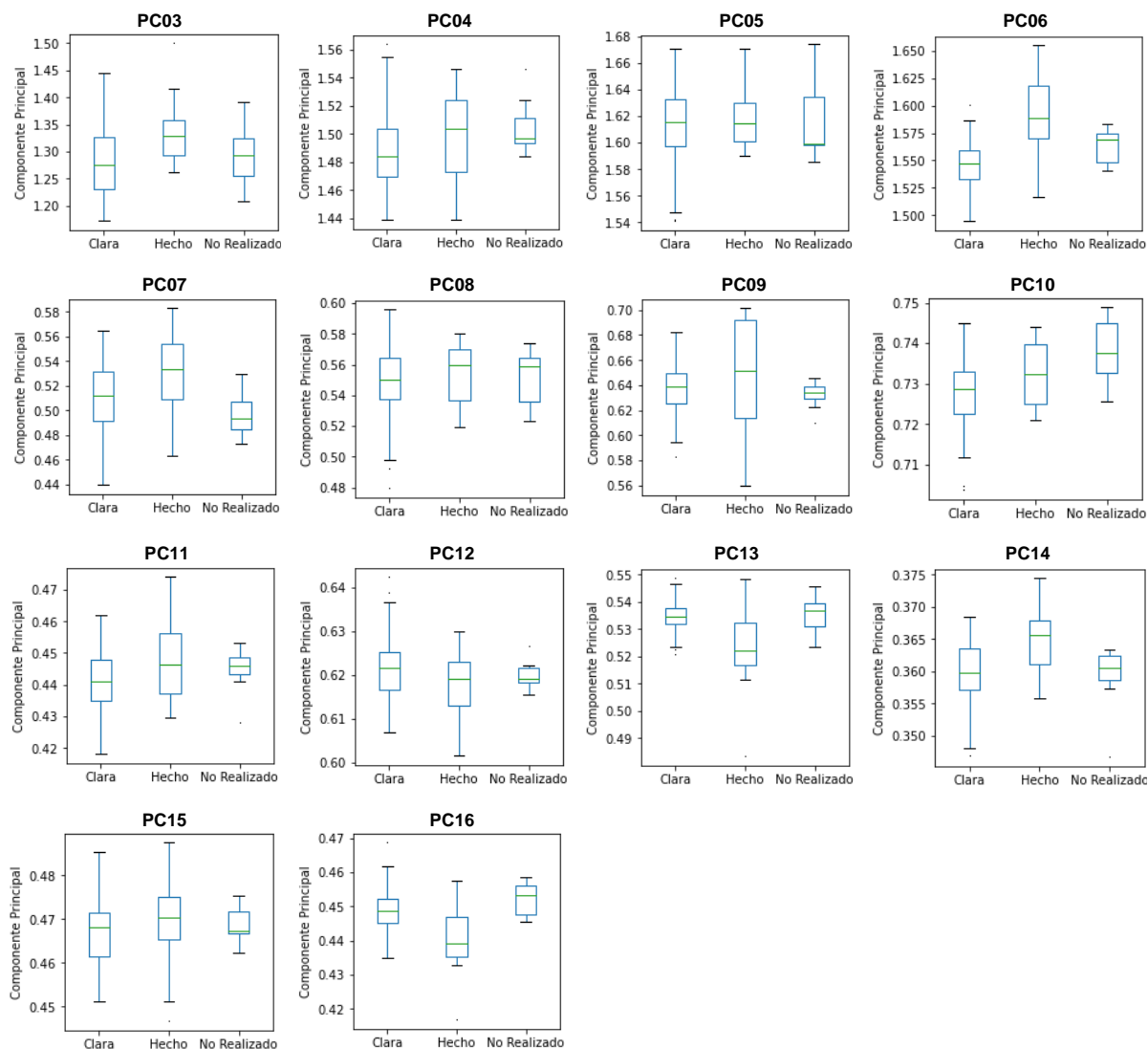


❖ **PINO LARICIO**




❖ PINO SILVESTRE


❖ **OTRAS CONÍFERAS**



3.4. TEST DE KRUSKAL WALLIS PERIODO 2017

HAYA 2017			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	10.842	0.004	SI
04	4.215	0.122	NO
05	3.883	0.143	NO
06	4.941	0.085	NO
07	26.801	0.000	SI
08	4.957	0.084	NO

QUERCUS 2017			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	3.059	0.217	NO
04	1.447	0.485	NO
05	2.963	0.227	NO
06	1.014	0.602	NO
07	7.825	0.020	SI
08	2.004	0.367	NO

09	1.597	0.450	NO
10	3.941	0.139	NO
11	2.343	0.310	NO
12	3.163	0.206	NO
13	0.856	0.652	NO
14	14.937	0.001	SI
15	7.862	0.020	SI
16	2.454	0.293	NO

09	1.856	0.395	NO
10	4.274	0.118	NO
11	3.059	0.217	NO
12	5.114	0.078	NO
13	2.857	0.240	NO
14	4.554	0.103	NO
15	3.601	0.165	NO
16	0.875	0.646	NO

OTRAS FRONDOSAS 2017			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	14.130	0.001	SI
04	15.473	0.000	SI
05	2.467	0.291	NO
06	8.774	0.012	SI
07	44.500	0.000	SI
08	2.015	0.365	NO
09	6.193	0.045	SI
10	12.624	0.002	SI
11	1.920	0.383	NO
12	1.771	0.412	NO
13	19.275	0.000	SI
14	13.487	0.001	SI
15	1.126	0.569	NO
16	11.178	0.004	SI

PINO LARICIO 2017			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	13.294	0.001	SI
04	20.257	0.000	SI
05	1.759	0.415	NO
06	13.638	0.001	SI
07	2.536	0.281	NO
08	6.294	0.043	SI
09	4.884	0.087	NO
10	10.567	0.005	SI
11	9.188	0.010	SI
12	0.749	0.688	NO
13	34.933	0.000	SI
14	0.949	0.622	NO
15	2.738	0.254	NO
16	8.697	0.013	SI

PINO SILVESTRE 2017			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	8.828	0.012	SI
04	4.113	0.128	NO
05	0.024	0.988	NO
06	4.581	0.101	NO
07	12.250	0.002	SI
08	0.776	0.678	NO
09	3.105	0.212	NO
10	3.115	0.211	NO
11	5.043	0.080	NO
12	4.647	0.098	NO
13	5.548	0.062	NO
14	2.910	0.233	NO
15	6.414	0.040	SI
16	4.690	0.096	NO

OTRAS CONÍFERAS 2017			
PC	Estadístico H	p-value	Significativo
03	31.921	0.000	SI
04	22.487	0.000	SI
05	1.100	0.577	NO
06	14.390	0.001	SI
07	10.102	0.006	SI
08	14.879	0.001	SI
09	2.638	0.267	NO
10	13.429	0.001	SI
11	4.075	0.130	NO
12	3.128	0.209	NO
13	30.056	0.000	SI
14	18.094	0.000	SI
15	1.040	0.594	NO
16	5.363	0.068	NO

