

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**RECONOCIMIENTO DE PATRONES  
TEMPORALES PARA LA CLASIFICACIÓN  
DIGITAL DE PASTIZALES DE ALTA MONTAÑA  
(*Bromion erecti* y *Nardion strictae*)**

**TEMPORAL PATTERN RECOGNITION IN HIGH  
MOUNTAIN PASTURES DIGITAL  
CLASSIFICATION (*Bromion erecti* y *Nardion  
strictae*)**

***Javier Franco García***

***Raquel Montorio Llovería  
Fernando Pérez-Cabello***

**Máster Universitario en**

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del  
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

**Noviembre de 2018**



**Universidad  
Zaragoza**

**Departamento de Geografía  
y Ordenación del Territorio**



## Resumen

*Las comunidades de pasto ocupan una gran parte de la superficie en el Pirineo Aragonés, constituyendo una fuente de recursos económicos debido a su explotación por parte del sector agrario, por lo que su gestión es clave. Numerosos estudios han profundizado en todo lo referente a los pastos. Muchos de ellos incorporan el estudio de imágenes de satélite como una herramienta más de análisis. En este caso, a partir de los productos de los satélites multiespectrales Sentinel-2 se pretende identificar las claves para la discriminación espectral de dos asociaciones clave en la gestión de recursos ganaderos desde una aproximación multitemporal (*Bromion erecti* y *Nardion strictae*), así como conocer su reparto en dos zonas de estudio concretas del Pirineo Aragonés mediante la aplicación de una clasificación supervisada utilizando el algoritmo Spectral Angle Mapper. A través de un amplio análisis estadístico de los datos extraídos de imágenes Sentinel-2, se establecen las mejores regiones del espectro electromagnético, índices de vegetación o fechas para el proceso de caracterización de los pastos de la zona de estudio que, en este caso, son los meses de septiembre y octubre en los que se acentúan las diferencias espectrales entre ambas comunidades de pastos; el índice MCARI2 el que mejor las caracteriza; y la fecha concreta del trece de septiembre de 2017 la que mejor resume estos sucesos en una sola imagen. Concretamente, la serie temporal de la evolución del índice MCARI2 muestra unos buenos porcentajes de acuerdo en la clasificación, empleando unos ángulos espectrales particularmente reducidos asociados a una alta precisión, por lo que se selecciona como objeto de la cartografía final de pastizales de alta montaña en el Pirineo Aragonés.*

**Palabras Clave:** SAM, MCARI2, Sentinel-2, Pirineo Aragonés, Fenología.

## Abstract

*Grassland communities spread along a very significant section of Aragon Pyrenees, being an important economic source itself due to agrarian exploitation. Hence, its management is a key issue. Quite a lot of studies have explored around this matter. They consider remote sensing products as a useful analysis tool. In this case, it is attempted to identify the key features in distinguish spectral differences between two basic grassland communities (*Bromion erecti* and *Nardion strictae*) from a multitemporal approach as well as know its location in two study zones in the Pyrenees, using multi-spectral Sentinel-2 products. Spectral Angle Mapper algorithm will be used to get the classification results. Through a wide statistical analysis of the Sentinel-2 data, the better features (vegetation indices, electromagnetic spectrum regions, dates) on making any differences between both kind of grassland communities are selected: vegetation index MCARI2, fall and summer-end, and September the 13th. Precisely, MCARI2 temporal signature shows good percentage of pixel-in-target made with outstanding precision according to average spectral angle value used in the process. Therefore, this is selected as the object-based final classification for perform a cartography about grasslands in the upper mountains in the Pyrenees.*

**Key Words:** SAM, MCARI2, Sentinel-2, Aragon Pyrenees, Phenology.

## Índice

1.	Introducción .....	pág. 1
2.	Área de estudio .....	pág. 3
3.	Metodología.....	pág. 6
3.1.	Obtención y organización de daros Sentinel-2 .....	pág. 6
3.2.	Tratamiento estadístico de los datos .....	pág. 10
3.3.	Clasificación .....	pág. 11
4.	Resultados .....	pág. 13
4.1.	Fenología de <i>Bromion erecti</i> y <i>Nardion strictae</i> .....	pág. 13
4.2.	Selección estadística de información espectral para la clasificación supervisada .....	pág. 17
4.3.	Clasificación de la zona de estudio .....	pág. 22
4.4.	Cartografía resultante de la clasificación .....	pág. 26
5.	Conclusiones .....	pág. 27
	Agradecimientos .....	pág. 28
	Bibliografía .....	pág. 29
	Anexos .....	pág. 31

## Índice de Figuras

1.	Figura 1. Diagrama que muestra las características de las parcelas definidas por PROPAST .....	pág. 3
2.	Figura 2. Pastos con predominio de <i>Bromion erecti</i> en Pirineos-1. ....	pág. 4
3.	Figura 3. Pastos con predominio de <i>Nardion strictae</i> en Pirineos-2.....	pág. 4
4.	Figura 4. Distribución de las parcelas de estudio .....	pág. 5
5.	Figura 5. En negro los puntos de nueva creación para ampliar la muestra en P-1 .....	pág. 5
6.	Figura 6. Diagrama de flujo resumen del proceso metodológico .....	pág. 6
7.	Figura 7. Modelo de cálculo del índice NDVI.....	pág. 11
8.	Figura 8. Modelo de cálculo del índice IRECI .....	pág. 11
9.	Figura 9. Modelo de cálculo del índice MCARI2 .....	pág. 12
10.	Figura 10. Evolución de la reflectividad (%o) de ambas especies a lo largo del año 2017.....	pág. 14
11.	Figura 11. Signatura espectral de <i>Bromion erecti</i> y <i>Nardion strictae</i> el 17 de noviembre de 2016.....	pág. 16
12.	Figura 12. Signatura espectral de <i>Bromion erecti</i> y <i>Nardion strictae</i> el 3 de octubre de 2018.....	pág. 17
13.	Figura 13. Evolución de la reflectividad de la banda 7 a lo largo de la serie temporal .....	pág. 19
14.	Figura 14. Evolución de la reflectividad de la banda 8A a lo largo de la serie temporal .....	pág. 20
15.	Figura 15. Evolución de los valores del índice NDVI a lo largo de la serie temporal .....	pág. 20
16.	Figura 16. Evolución de los valores del índice MCARI2 a lo largo de la serie temporal .....	pág. 21
17.	Figura 17. Evolución de los valores del índice IRECI a lo largo de la serie temporal.....	pág. 21
18.	Figura 18. Cartografía de clasificación de especies de pasto mediante SAM a partir de MCARI2.....	pág. 26

---

## Índice de Tablas

1. Tabla 1. Tabla que sintetiza las propiedades del MSI en las dos plataformas Sentinel-2 ..... pág. 7
  2. Tabla 2. Imágenes Sentinel-2 obtenidas para el año 2017..... pág. 8
  3. Tabla 3. Valor de "Sig." para cada banda y cada fecha .....pág. 18
  4. Tabla 4. Valor de "Sig." para cada índice y cada fecha .....pág. 18
  5. Tabla 5. Resultados generales de clasificación 0.1 radianes .....pág. 22
  6. Tabla 6. Resultados generales de clasificación 0.07 radianes .....pág. 23
  7. Tabla 7. Resultados generales de clasificación 0.05 radianes .....pág. 23
  8. Tabla 8. Resultados de la segunda validación de la clasificación 0.1 radianes .....pág. 24
  9. Tabla 9. Resultados de la segunda validación de la clasificación 0.07 radianes .....pág. 24
  10. Tabla 10. Resultados de la segunda validación de la clasificación 0.05 radianes .....pág. 24
-

## 1. INTRODUCCIÓN

Una gran parte de la superficie de los montes está ocupada por pastos. Estos son una fuente de riqueza para el ser humano en la medida en que sustentan un vasto sector como es el ganadero, por lo que su gestión se erige como un objeto de relevancia tanto desde el punto de vista económico como ecológico y biológico, pues más de la mitad de la flora y de la fauna de estos ecosistemas pastorales se asocian en mayor o menor grado con estas superficies (García-González, *et al.*, 2006). Debido a esta importancia de las distintas coberturas de pasto, se puede considerar que la degradación de los recursos pastables puede llegar a ser un problema social de primer orden y es una cuestión importante el detectar, evitar y minimizar las amenazas de los cambios de uso y climáticos en la conservación de los espacios naturales (Alados *et al.*, 2010).

Uno de los rasgos que caracterizan la alta montaña pirenaica aragonesa es, sin duda, la acción del pastoreo a la que han estado sujetas las diferentes comunidades de pastos que aquí se han desarrollado, si bien esta presión del pastoreo ha sido variable a lo largo del tiempo y dependiente de distintos factores geográficos como el clima o la topografía (García-González *et al.*, 1998). De hecho, salvando algunas excepciones, durante las últimas décadas se ha producido un descenso de los censos ganaderos en muchos lugares de los Pirineos, que han causado una serie de cambios cualitativos en relación con las especies y comunidades pastantes (García-González *et al.*, 2005).

Dentro de dichas formaciones de pastos se pueden distinguir más de cien comunidades vegetales o asociaciones fitosociológicas, condicionadas por diversos factores de distribución como el clima o los suelos (Badía *et al.*, 2002). Dos de estas comunidades importantes, tanto para la actividad pastoral, como para la composición paisajística de los puertos de alta montaña del Pirineo, son el *Bromion erecti* y el *Nardion strictae* (García-González *et al.*, 1998). Estas dos formaciones presentan una composición, forma y distribución muy parecida. Su importancia radica en su gran presencia espacial a lo largo de todo el ecosistema de pastos. Si bien es cierto que quizá el *Bromion erecti* presenta una mayor importancia si cabe, debido, principalmente a su mayor valor nutritivo para las distintas especies ganaderas que se alimentan de estos recursos (García-González *et al.*, 2005). Concretamente, el ganado ovino tiende a consumir masivamente las comunidades de *Bromion erecti*, dejando de lado las de *Nardion strictae*.

Desde un punto de vista ecológico, el equilibrio entre las propias comunidades y el uso que se hace de ellas es esencial para el medio ambiente. De hecho, el pastoreo moderado contribuye a mantener la diversidad vegetal y la productividad de los pastos, además de disminuir el riesgo de incendios y aumentar la diversificación del paisaje. Asimismo, los ecosistemas de pasto son muy sensibles a la dinámica de cambios en estos ecosistemas provocada por el abandono rural, el descenso de la actividad ganadera y el cambio climático (Alados *et al.*, 2014).

En definitiva, los ecosistemas de pastos constituyen una superficie dominante en el ambiente de alta y media montaña del Pirineo aragonés, por lo que su estudio se torna en una fehaciente necesidad para potenciar el pasto como recurso y facilitar la gestión de estas zonas. A raíz de ello, surgen distintos estudios y proyectos cuyo objeto central es el pasto y todo lo que lo rodea y condiciona. Es el caso del proyecto del Plan Nacional (CGL2016-80783-R) denominado *Papel de las interacciones planta-suelo en el mantenimiento de la productividad y la diversidad de ecosistemas pastorales* (PROAST) del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC). Este proyecto tiene como finalidad última profundizar en los mecanismos que subyacen en las interacciones ganado-planta-suelo, para fomentar la inclusión de los procesos que ocurren en el subsuelo en la gestión óptima de recursos, integrando diferentes ámbitos relacionados con el estudio de los ecosistemas pastorales, como por ejemplo sus propiedades químicas, edafológicas, biofísicas o espectrales.

Partiendo de la base sentada por el proyecto PROAST, se puede considerar la teledetección como una herramienta más de análisis de las dinámicas en las que intervienen las comunidades pastables. Este enfoque, como se ha mencionado previamente, está encaminado a considerar las propiedades espectrales de los pastos como cubierta y de cada una de las comunidades que lo componen de forma independiente.

No obstante, esta perspectiva de estudio de los pastos en la teledetección tiene también un marcado recorrido en la bibliografía. Han sido numerosas las investigaciones que han utilizado la teledetección para caracterizar, por ejemplo, la fenología y vigor vegetal de los pastos (Hill, 2013; Asner y Heidebrecht, 2002). Sin embargo, a tenor de lo concluido en estos estudios, el uso de la teledetección ha resultado más efectivo en la tarea de establecer e identificar tendencias temporales de las zonas de pasto que en un monitoreo intensivo de las condiciones de los propios pastizales (Hill, 2013).

La variedad de sensores utilizados para llevar a cabo estos proyectos ha sido considerable. Si bien es cierto que ha habido una clara tendencia en cuanto al uso constante de Landsat (TM, ETM+ y OLI) como plataforma de referencia en el análisis de propiedades y dinámicas de pastos mediante teledetección (Yang *et al.*, 1998; Marsett *et al.*, 2006; Diao y Wang, 2018); otros sensores como Hyperion, MODIS (Guerschman *et al.*, 2009) o AVIRIS (Asner y Heidebrecht, 2002), también sido explorados.

El otro sensor multiespectral que se ha confirmado como referencia en esta línea de investigación es, sin lugar a duda, Sentinel-2. Antes de la propia puesta en órbita del primero de los dos satélites gemelos, algunos autores como Hill (2013) o Clevers y Gitelson (2013) ya señalaban las propiedades del sensor multiespectral de los nuevos satélites de la ESA como idóneas para el desarrollo de estudios en esta dirección debido a la versatilidad que presenta con sus trece bandas y, particularmente, con las posibilidades que ofrece el uso de dos bandas en el *Red Edge* y otras dos en el Infrarrojo Cercano. Pese al poco tiempo que ha pasado desde que los Sentinel-2 están a pleno rendimiento, su utilidad en el estudio de las características de los pastos ha sido ya probada (Shoko y Mutanga, 2017; Immitzer *et al.*, 2016). En el caso de Immitzer *et al.* (2016), realizaron la primera experiencia de clasificación de especies de cultivos y árboles en Europa Central, obteniendo unos resultados satisfactorios, aunque, según ellos mismos, mejorables en cuanto la misión Sentinel-2 entrara en plena operatividad. Por otro lado, Shoko y Mutanga (2017), tras analizar la posibilidad de discriminar entre dos tipos de especies herbáceas mediante Sentinel-2, concluyeron que el potencial de esta misión para la monitorización de especies vegetales quedaba totalmente demostrado. Esta capacidad se puede atribuir a la información complementaria que contienen las nuevas bandas de Sentinel-2 en el *Red Edge* y en el NIR (Shoko y Mutanga, 2017).

Más allá de los sensores explorados en la caracterización de superficies pastables mediante teledetección ambiental, se ha considerado en varias ocasiones la perspectiva temporal como una variable de gran potencial en este sentido (Hill, 2013). La ventaja de este enfoque temporal radica en la sensibilidad de las firmas temporales de las cubiertas a los cambios producidos en los valores de reflectividad por el avance del ciclo fenológico (Diao y Wang, 2018). En el contexto de este proyecto, la consideración de la dimensión multitemporal tendrá un papel protagonista en todo el análisis y tratamiento de datos.

Asimismo, también se ha extendido el uso de índices de vegetación entre los autores dedicados al análisis de las propiedades de las superficies de pasto, ya sea para identificar su contenido de clorofila, su extensión a lo largo del año, su relación con el secuestro de carbono o la variación sufrida por el avance del ciclo fenológico en las diferentes especies (Hill, 2013; Clevers y Gitelson, 2013; Guerschman *et al.*, 2009; Marsett *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 1998).

Conociendo de forma sucinta las características del objeto de estudio, su contexto en forma de proyecto y las consideraciones previas aportadas por la bibliografía relacionada, se puede formular un objetivo principal de este trabajo. Este no es otro que identificar claves para la discriminación de comunidades de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* en base a su comportamiento espectral analizado desde una perspectiva temporal. Esta no debe ser una tarea fácil pues ambas especies son muy similares. Obtener unos buenos resultados en la clasificación de ambas comunidades pastables puede llegar a tener un gran impacto positivo en la gestión de estos recursos, debido a que, como se ya se ha comentado, el *Bromion erecti* es una de las bases alimentarias del ganado ovino, mientras que el *Nardion strictae* no suele ser consumido por las distintas especies ganaderas. Además de este objetivo principal, también se enumeran dos objetivos específicos a cumplimentar en el desarrollo del trabajo:

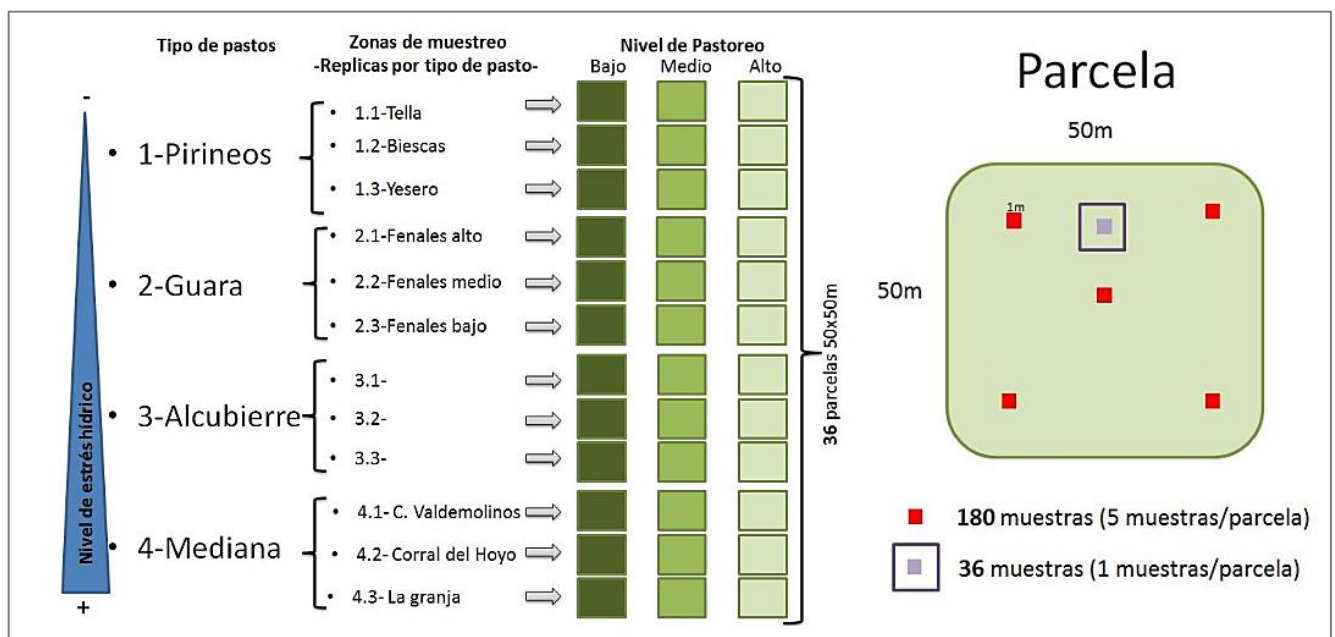
- Estudiar el ciclo fenológico tanto de *Bromion erecti* como de *Nardion strictae*, a partir del tratamiento de datos espectrales extraídos de las imágenes Sentinel-2.
- Elaborar una cartografía que muestre la distribución espacial de los dos tipos de pasto en dos áreas concretas del Pirineo Aragonés.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio en la que se desarrolla este trabajo forma parte de las zonas de muestreo consideradas en el proyecto PROPAST. En concreto, se sitúa en el Pirineo Aragonés, donde los pastos, como ya se ha comentado en la introducción, son un recurso estratégicamente importante tanto por la cantidad de espacio que ocupan en este ambiente como por su importancia económica y productiva (García-González *et al.*, 2006).

Dentro de las posibilidades y características concretas que ofrece este ambiente de media y alta montaña, en el contexto de PROPAST se han delimitado hasta tres zonas de muestreo de las cuales se conocen sus particularidades en cuanto a especies que predominan en las cubiertas. De esta manera, se consideran Pirineos-1 (P1), Pirineos-2 (P2) y Pirineos-3 (P3), como zonas de extracción de datos para este proyecto. Las tres se localizan en distintos puntos de la provincia de Huesca (Aragón, España).

Cada una de las tres zonas está formada por tres parcelas cuadradas de 50 metros de lado, caracterizadas por el nivel de pastoreo que se produce sobre de ellas (alto, bajo o medio). La información espacial proporcionada desde el proyecto es la referencia de las esquinas de estas parcelas, en forma de puntos.



**Figura 1.** Diagrama que muestra las características de las parcelas definidas por PROPAST.

Pirineos-1 es la zona más oriental de las tres aquí consideradas. Se sitúa en las proximidades del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, dentro del límite municipal de Tella, en el Valle de Bielsa. Por otro lado, Pirineos-2 y Pirineos-3 están localizados varios kilómetros al oeste de P1, en las cercanías del embalse de Búbal, en el Valle del Aragón. No obstante, las tres zonas comparten unas características geográficas y climáticas muy similares, con temperaturas medias anuales de unos 7 grados centígrados y precipitaciones medias cuyos valores rondan los 1000 milímetros al año. Ambos sectores se denominarían clima *Cfb* en la clasificación de Köppen.

Gracias a las experiencias de campo realizadas en el contexto del proyecto PROPAST, se han reconocido las características de la cubierta de cada una de las parcelas. Es decir, se han identificado con exactitud las especies que las pueblan. Así, Pirineos-1 cuenta con sus tres parcelas cubiertas en su mayoría por formaciones de *Bromion erecti*; Pirineos-3 está marcada por la presencia, en todas sus áreas, de formaciones de *Nardion strictae*; y, por su parte, Pirineos-2 presenta una parcela ocupada por comunidades de *Bromion erecti* (la correspondiente al pastoreo bajo), y, las otras dos restantes, cubiertas por *Nardion strictae*.

Ambas comunidades de pasto comparten muchas similitudes en cuanto a su composición y distribución interna de especies. Por ejemplo, atendiendo a las formas biológicas, los hemicriptófitos

conforman más del 90% de los dos tipos de pasto (Gómez-García y García-González, 2011). Estructuralmente, las comunidades de *Bromion erecti* (Figura 2) son pastos constituidos por diversas gramíneas, cárices, leguminosas y muchas otras especies que conforman un tapiz de alta cobertura con un porte de entre 10 y 40 cm de alto (Gómez-García, 2008).



**Figura 2.** Pastos con predominio de *Bromion erecti* en Pirineos-1. Fotografía cedida por Maite Gartzia.

Por su parte, las asociaciones de *Nardion strictae* (Figura 3) suelen tratarse de pastos asentados sobre sustratos ácidos en laderas con innivación poco abundante, con predominio también de gramíneas que forman un césped denso y alto de hasta 30 cm (Gómez-García, 2008).

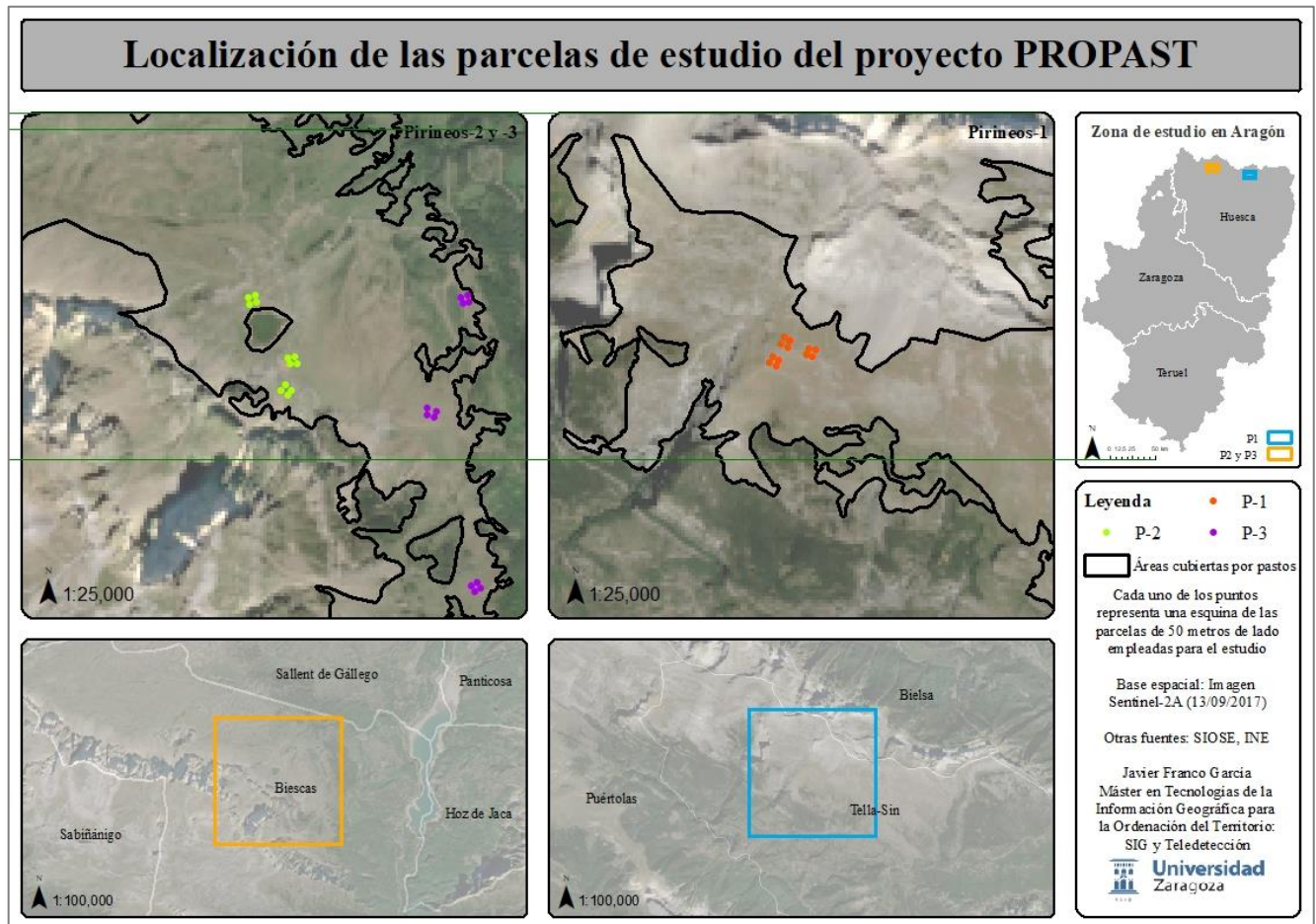


**Figura 3.** Pastos con predominio de *Nardion strictae* en P-2 (Fotografía cedida: Maite Gartzia).

En las dos figuras anteriores se puede apreciar perfectamente la gran similitud que existe entre ambas comunidades de pasto, si bien es cierto que las comunidades de *Bromion erecti* no están dominadas en ningún caso por una única especie, mientras que las de *Nardion strictae* pueden estarlo por *Nardus stricta* (Gartzia et al., 2015).

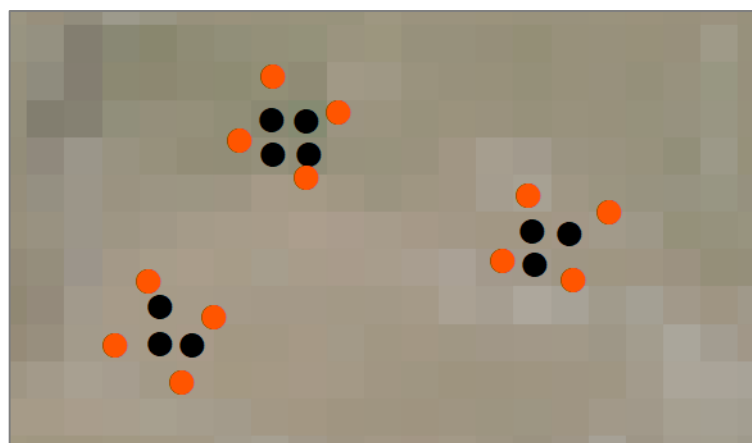


En la siguiente cartografía se presenta la distribución de los puntos correspondientes a los vértices de estas parcelas (Figura 4):



**Figura 4.** Distribución de las parcelas de estudio.

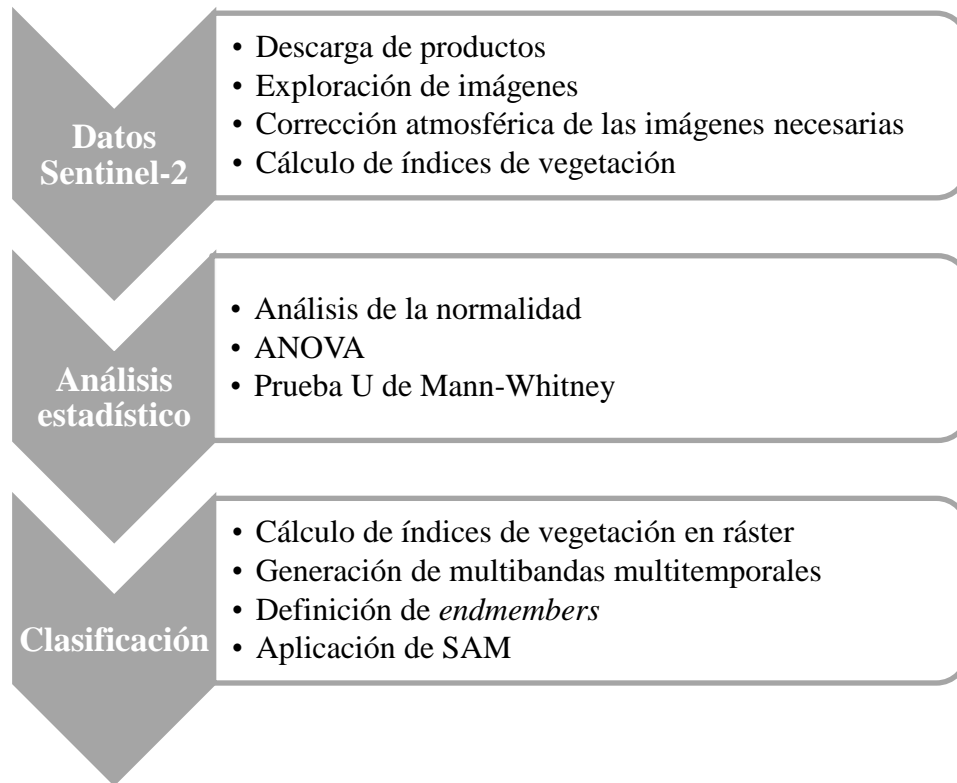
Tomando en consideración, pues, las cuatro esquinas de las 9 parcelas totales, la muestra de datos de referencia sería de 36 puntos totales. Sin embargo, la distribución de estos puntos separados entre sí por 50 metros no es la ideal para operar con los datos derivados de las imágenes Sentinel-2, de resolución 20 metros, que se van a emplear. Por tanto, se decide ampliar la muestra determinando nuevos puntos de referencia que queden enmarcados dentro de las parcelas de 50 metros de lado y que aporten información de sus píxeles correspondientes en las imágenes Sentinel-2, de tal forma que, en vez de operar únicamente con los cuatro vértices, se proceda también con los valores centrales de las parcelas, tal y como vemos en la Figura 5. De esta manera, se considera una muestra final de 62 datos: 22 puntos en P-1, 20 en P-2 y otros 20 en P-3.



**Figura 5.** En negro los puntos de nueva creación para ampliar la muestra en P-1.

### 3. METODOLOGÍA

En este apartado se van a exponer los procedimientos desarrollados para elaborar el trabajo. Estos han sido estructurados en tres bloques o fases diferentes, agrupados en función de la naturaleza de análisis que abordaban y las herramientas utilizadas para abarcarlos. El siguiente diagrama de flujo muestra este proceso de manera general, antes de pasar a una explicación más pormenorizada (Figura 6).



**Figura 6.** Diagrama de flujo que resume el proceso metodológico seguido.

#### 3.1. Obtención y organización de datos Sentinel-2

Este estudio se servirá de los productos producidos por la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (*European Spatial Agency*, ESA). Esta misión forma parte del programa Copernicus, y tiene como objetivo proporcionar datos de la superficie terrestre para el estudio de todas las variables ambientales posibles. Concretamente, la misión Sentinel-2 está compuesta por dos plataformas gemelas: Sentinel-2A y Sentinel-2B, lanzadas en 2015 y 2017, respectivamente. Se trata de dos satélites multiespectrales de gran resolución que están destinados a aportar imágenes para analizar la cubierta terrestre y las grandes superficies de aguas continentales. Sus aplicaciones son muy variadas, pues el sensor y las características de su órbita permiten a los usuarios explotar la información espacial y espectral de alta resolución sin precedentes, haciendo estos datos idóneos para el estudio, por ejemplo, de la fenología de la vegetación o de la biomasa de los pastos (Vuolo *et al.*, 2018).

El mencionado sensor que equipan ambas plataformas es el *Multi Spectral Instrument* (MSI), un instrumento basado en la herencia dejada por otros programas de teledetección espacial como SPOT o Landsat. MSI cubre una longitud de onda que abarca desde los 443 nm hasta los 2190 nm en trece bandas diferentes, con una resolución espacial que varía entre los 10 y los 60 metros (Tabla 1).

**Tabla 1.** Tabla que sintetiza las propiedades del MSI en las dos plataformas Sentinel-2 (Fuente: ESA).

Band Number	S2A		S2B		Spatial resolution (m)
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	
1	443.9	27	442.3	45	60
2	496.6	98	492.1	98	10
3	560.0	45	559	46	10
4	664.5	38	665	39	10
5	703.9	19	703.8	20	20
6	740.2	18	739.1	18	20
7	782.5	28	779.7	28	20
8	835.1	145	833	133	10
8a	864.8	33	864	32	20
9	945.0	26	943.2	27	60
10	1373.5	75	1376.9	76	60
11	1613.7	143	1610.4	141	20
12	2202.4	242	2185.7	238	20

Las imágenes capturadas por los satélites Sentinel se presentan en diferentes productos en función del grado de tratamiento al que han sido sometidos. El nivel óptimo de tratamiento para este estudio es el Level-2A, pues incorpora las correcciones atmosféricas necesarias para poder proceder con el estudio que se quiere llevar a cabo.

Los datos de los satélites Sentinel-2 necesarios para este estudio se encuentran disponibles, de forma gratuita, en el portal web de la ESA, donde estos productos pueden ser descargados aplicando los filtros espaciales que el usuario requiera. Sin embargo, antes de proceder con la descarga masiva de las imágenes de la zona de estudio, se determina que el periodo de análisis de imágenes de satélite para lograr los objetivos marcados debe ser únicamente el año 2017. Esta decisión responde, principalmente, a dos motivos: la escasa serie de imágenes de 2016, por baja calidad de los productos y por no haberse lanzado todavía la segunda plataforma (Sentinel-2B), y al periodo de desarrollo de este trabajo que impide utilizar la serie de 2018 de manera completa.

Así pues, se procede con la descarga de todas las imágenes disponibles de 2017. En la siguiente tabla se recogen todas las imágenes descargadas para el año 2017 y sus características básicas (Tabla 2):

**Tabla 2.** Imágenes Sentinel-2 obtenidas para el año 2017

Fecha (día/mes)	Satélite	Nivel de producto	Observaciones	Selección
16/01	2A	Level-1C	Zona de estudio cubierta por nubes	No
26/01	2A	Level-1C	Bastantes nubes y sombras	No
05/02	2A	Level-1C	Nubes	No
15/02	2A	Level-1C	Nieve sobre las parcelas de estudio	No
25/02	2A	Level-1C	Despejado, pero con nieve	No
07/03	2A	Level-1C	Nieve y nubes	No
17/03	2A	Level-1C	Nieve abundante	No
30/03	2A	Level-2A	Nieve	No
06/04	2A	Level-2A	Nieve	No
16/04	2A	Level-2A	Nieve solo en un grupo de parcelas	No
26/04	2A	Level-2A	Nubes	No
06/05	2A	Level-2A	Nubes	No
26/05	2A	Level-2A	Despejado	Sí
05/06	2A	Level-2A	Nubes	No
15/06	2A	Level-2A	Despejado en P2 y P3. Nubes en P1	No
25/06	2A	Level-2A	Nubes	No
05/07	2A	Level-2A	Despejado	Sí
10/07	2B	Level-1C	Nubes	No
20/07	2B	Level-1C	Nubes en P2 y P3. Despejado en P1	No
30/07	2B	Level-1C	Nubes	No
30/07	2B	Level-1C	Nubes en P2 y P3. Despejado en P1	No
09/08	2B	Level-1C	Nubes	No
14/08	2A	Level-2A	Despejado	Sí
19/08	2B	Level-1C	Toda la imagen despejada salvo P1	No
24/08	2A	Level-2A	Despejado	Sí
29/08	2B	Level-1C	Nubes	No
03/09	2A	Level-2A	Nubes	No
08/09	2B	Level-1C	Despejado	Sí
13/09	2A	Level-2A	Despejado	Sí
18/09	2B	Level-1C	Nubes	No
23/09	2A	Level-2A	Nubes	No
28/09	2B	Level-1C	Despejado	Sí
03/10	2A	Level-2A	Despejado	Sí
08/10	2B	Level-1C	Despejado	Sí
13/10	2A	Level-2A	Despejado	Sí
23/10	2A	Level-2A	Nubes rodeando P1	No
28/10	2A	Level-1C	Despejado	Sí
02/11	2A	Level-2A	Nubes	No

07/11	2B	Level-1C	Nieve	No
12/11	2A	Level-2A	Despejado	Sí
17/11	2B	Level-1C	Algunos pixeles de P1 con nieve	No
22/11	2A	Level-2A	Algo de nieve en P1	No
27/11	2B	Level-1C	Niebla	No
02/12	2A	Level-2A	Nieve abundante	No
07/12	2B	Level-1C	Nubes	No
12/12	2A	Level-2A	Nieve	No
17/12	2B	Level-2A	Nieve y nubes	No
22/12	2A	Level-2A	Nieve	No
27/12	2B	Level-2A	Nubes	No

Como puede apreciarse, de toda la serie temporal de imágenes disponibles solo se seleccionan 12 imágenes para trabajar con ellas, puesto que el resto presentan condiciones adversas para su tratamiento, derivadas de la situación climática concreta del área de estudio. Asimismo, se puede observar que algunas de las imágenes elegidas para operar con ellas presentan un nivel de corrección Level-1C. Es decir, se trata de productos que muestran reflectividad en el techo de la atmósfera (*Top of Atmosphere*, TOA) y que, por tanto, no presentan una corrección atmosférica adecuada. Mediante Sen2Cor (un algoritmo específico desarrollado por la ESA para convertir los productos Level-1C en Level-2A, que muestran reflectancia sin influencia de la atmósfera (*Bottom of Atmosphere*, BOA), a partir de datos de la propia imagen); las imágenes con fecha 08/09, 28/09, 08/10 y 28/10 son corregidas para eliminar los gases, aerosoles, vapor de agua y cirrus que puedan haber sido captados.

De estas 12 imágenes disponibles, se decide trabajar con las bandas proporcionadas en la resolución espacial de 20 metros de lado para cada pixel, pues es en esta resolución en la que se capta la información de las bandas 5, 6, 7 y 8A, correspondientes al *Red Edge* (RE) y al Infrarrojo Cercano (*Near Infra Red*, NIR), que son bandas clave en el estudio de la vegetación y, concretamente, de los pastos. Además, los productos Sentinel-2 presentan las bandas del visible, inicialmente tomadas con una resolución espacial de 10 metros, remuestreadas a píxeles de 20 metros de lado.

Los valores de los píxeles coincidentes con los 62 puntos objeto de estudio han sido extraídos a una base de datos de modo que, para cada uno de los 62 puntos pertenecientes a las 12 parcelas de estudio, se presentan los valores de reflectividad (en tantos por diez mil) de la cubierta representada en cada una de las bandas de Sentinel-2 con 20m de resolución espacial. Estas cubiertas no son otras que las dos asociaciones de pasto estudiadas: *Bromion erecti* y *Nardion Strictae*. Por tanto, llegados a este punto se conocen con precisión los valores de reflectividad de cada una de las dos comunidades en cada banda, cada fecha de la serie temporal y cada zona de estudio.

Además, para contar con una base de datos más completa y manejar información de interés para el estudio, se calculan diversos índices de vegetación que pueden caracterizar mejor a las dos especies. De entre los numerosos índices de vegetación disponibles para su cálculo, se han elegido algunos de los que relacionan las regiones del *Red Edge*, del NIR y del SWIR (*Short-Wave InfraRed*), pues son las más sensibles al vigor vegetal, a la humedad y al contenido en agua. De hecho, el cálculo de algunos de ellos tiene por objeto la caracterización del contenido de clorofila de las cubiertas, variable de suma importancia en la interpretación de la calidad de la vegetación debido al rol que juega esta sustancia en el proceso de fotosíntesis (Frampton *et al.*, 2013; Main *et al.*, 2011). Especial interés presentan los índices que consideran el RE en sus fórmulas, puesto que es la región del espectro en la que la vegetación se caracteriza de una mejor forma, al situarse entre el máximo de absorción que ocurre en el Rojo y la alta reflectividad que sucede en el NIR (Frampton *et al.*, 2013).

Las fórmulas teóricas de los índices se ejecutan con las bandas correspondientes en Sentinel-2, tal y como puede observarse en el siguiente listado de índices utilizados:

- *Normalized Difference Vegetation Index, NDVI:*

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} = \frac{B8A - B04}{B8A + B04}$$

- *Normalized Burn Ratio, NBR:*

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} = \frac{B8A - B12}{B8A + B12}$$

- *Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 2, MCARI2:*

$$MCARI2 = \frac{(1.5 (2.5 (NIR-G) - 1.3 (R-G)))}{\sqrt{((2NIR+1)^2 - 6NIR - 5\sqrt{R})}} = \frac{(1.5 (2.5 (B8A-B03) - 1.3 (B04-b03)))}{\sqrt{((2*B8A+1)^2 - 6*B8A - 5\sqrt{B04})}}$$

- *Modified Triangular Vegetation Index 2, MTVI2:*

$$MTVI2 = \frac{(1.5 (2.5 (NIR-G) - 2.5 (R-G)))}{\sqrt{((2NIR+1)^2 - 6NIR - 5\sqrt{R})}} = \frac{(1.5 (2.5 (B8A-B03) - 2.5 (B04-b03)))}{\sqrt{((2*B8A+1)^2 - 6*B8A - 5\sqrt{B04})}}$$

- *MERIS Terrestrial Chlorophyll Index, MTCI:*

$$MTCI = \frac{NIR - RE}{RE - R} = \frac{B8A - B06}{B06 - B04}$$

- *Sentinel-2 Red Edge Position, S2REP:*

$$S2REP = 705 + 35 * \frac{\frac{NIR + R}{2} - RE1}{RE2 - RE1} = 705 + 35 * \frac{\frac{B8A + B04}{2} - B05}{B06 - B05}$$

- *Inverted Red Edge Chlorophyll Index, IRECI:*

$$IRECI = \frac{NIR - R}{RE1/RE2} = \frac{B8A - B04}{B05/B06}$$

### 3.2. Tratamiento estadístico de los datos

Sobre toda la serie de datos de reflectividad para cada punto de estudio se aplican diversos procedimientos estadísticos, en el entorno de IBM SPSS Statistics 20, encaminados a conocer la existencia o no de diferencias espectrales significativas entre *Bromion erecti* y *Nardion strictae*.

En primer lugar, se analiza la normalidad de la distribución de las distintas series de datos de manera independiente, con el objetivo de conocer si cada conjunto de 62 datos (tantos como puntos) pueden soportar según qué tipo de análisis estadístico que requiere que esta distribución sea normal.

Debido a que no todas las series de datos presentan normalidad en la distribución de los mismos, se considera la aplicación de dos tipos de análisis distintos para conocer si existen diferencias significativas para las dos especies de pasto estudiadas. En primer lugar, se realiza un Análisis de la Varianza (ANOVA) para los conjuntos de datos normales y una Prueba U de Mann-Whitney en aquellas series de datos no-normales.

### 3.3. Clasificación

En esta etapa del proceso metodológico del trabajo se abordan los pasos necesarios para desembarcar en la clasificación del área de estudio en una u otra especie de pasto a partir de las diferencias espectrales significativas entre ambas. A partir de los datos y las herramientas a disposición en este trabajo, es posible realizar una clasificación por el método elegido para cualquiera de las 12 fechas en las que existe una imagen de calidad. Sin embargo, en concordancia con los objetivos dispuestos en el primer apartado del documento, la temporalidad en la evolución de las variables relativas a los pastos va a ser tomada en cuenta.

Considerando la variable temporal como una oportunidad de dotar a la clasificación de una mayor precisión, se procede a la construcción de tantas multibandas multitemporales como variables (índices, bandas espectrales) que se consideran hábiles para realizar una clasificación. Es decir, el objeto de clasificación, en este caso, no será una única imagen de una fecha concreta, si no un multibanda que contenga la información temporal de una sola variable. Esta variable puede ser una única banda del espectro o un índice de vegetación, en este contexto.

Previo a la creación de estos multibandas multitemporales son calculados los ráster correspondientes a los índices para las doce imágenes de estudio, que se van a utilizar en esta fase del trabajo, a través del diseño de modelos con las operaciones necesarias en el entorno del *Spatial Modeler* de ERDAS Imagine 2015. Estos modelos adoptan la siguiente forma visual (Figuras 7, 8 y 9).

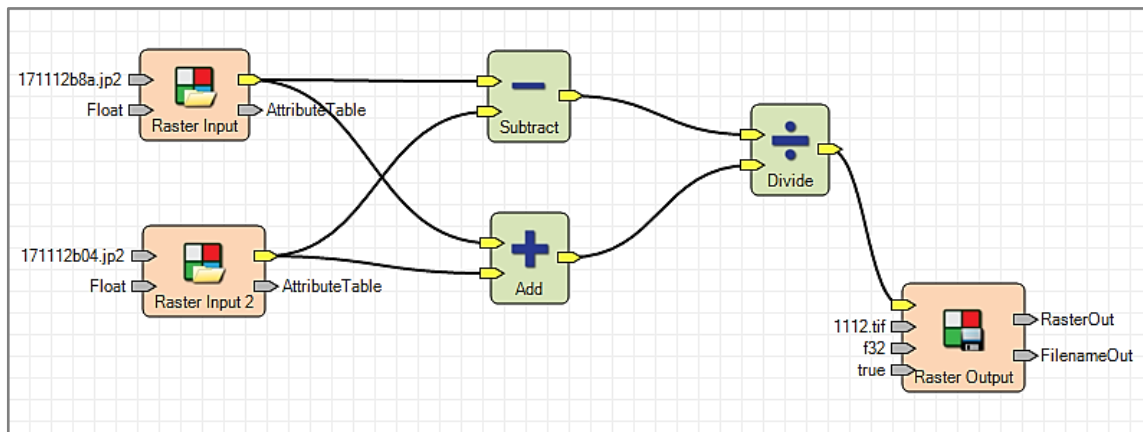


Figura 7. Modelo de cálculo del índice NDVI.

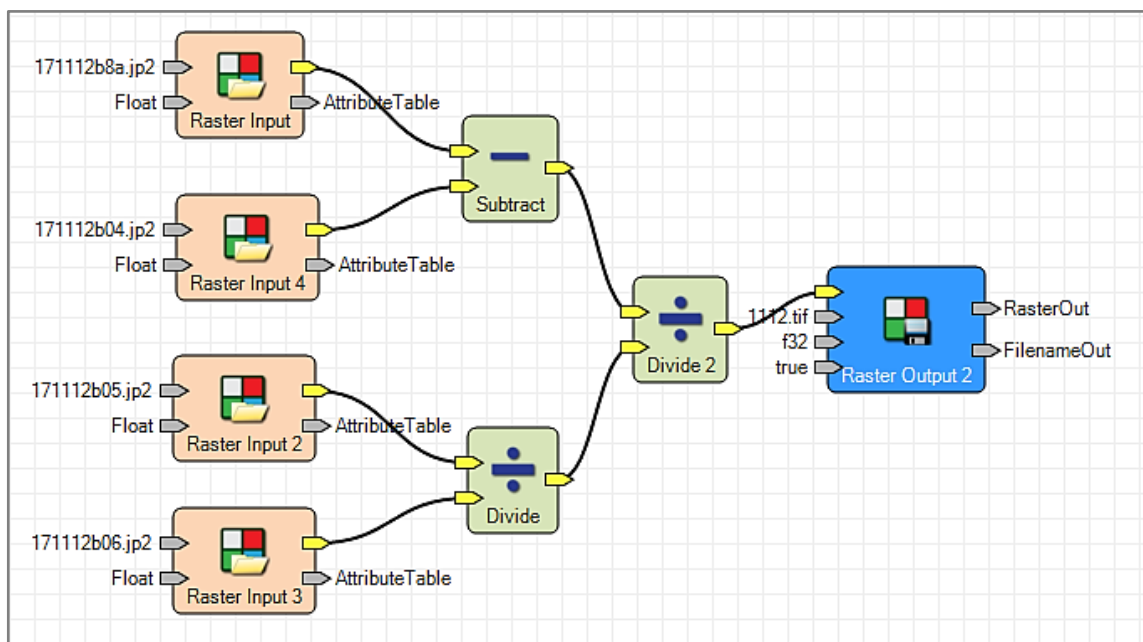
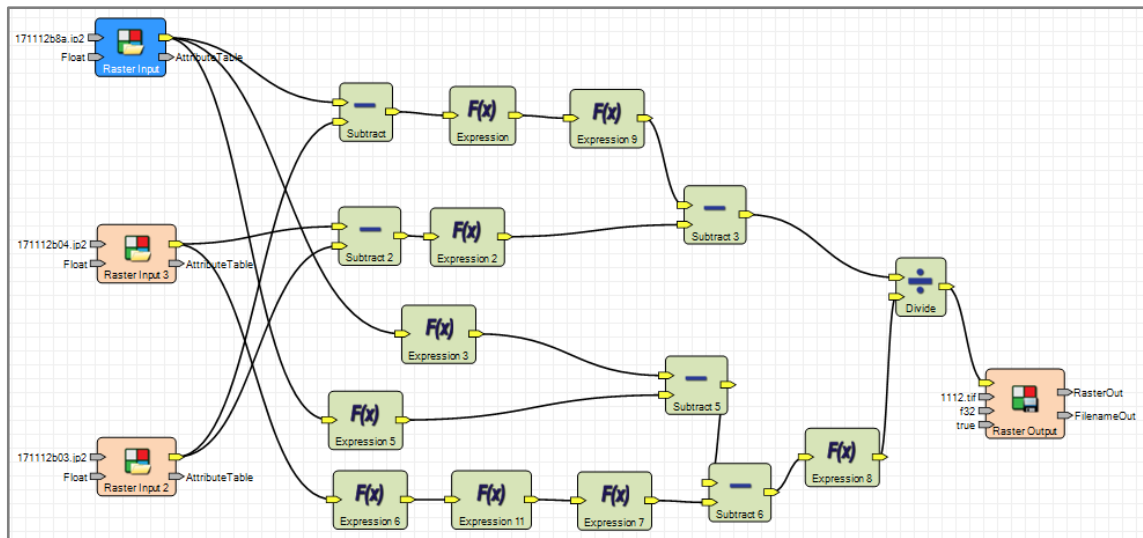


Figura 8. Modelo de cálculo del índice IRECI.



**Figura 9** Modelo del cálculo del índice MCARI2 para una de las imágenes.

A partir de la determinación de las variables con las que se ejecutará el algoritmo de clasificación, se construyen tantas multibandas como sean necesarios, manteniendo siempre el orden cronológico para que la firma temporal de las variables no sufra ninguna alteración.

El método seleccionado para llevar a cabo la clasificación de la zona de estudio en las dos comunidades diferentes de pasto estudiadas es el *Spectral Angle Mapper* (SAM). Este método utiliza una regla de decisión de clasificación basada en los ángulos espectrales existentes entre el espectro de referencia y el espectro de cada cubierta (Stephen *et al.*, 2004). Es decir, mientras los métodos de clasificación más extendidos comparan la firma espectral -o, en este caso, temporal- de cada píxel con la firma de referencia de un área entrenada para esta comparación por el analista; SAM compara cada píxel de la imagen con cada *endmember* determinado, asignando al píxel la categoría correspondiente al que tenga una firma más similar, dentro de un rango de ángulo espectral, en radianes, definido por el usuario (Girouard *et al.*, 2004).

Por tanto, para poder ejecutar este algoritmo de clasificación en el entorno de ENVI Classic 5.3, es necesaria la previa definición de los *endmembers* que supongan la categoría de la clasificación que se pretende realizar. En este caso concreto, para cada clasificación ejecutada, se definen dos *endmembers* a partir de las firmas temporales de *Bromion erecti* y *Nardion strictae*.

El ángulo máximo definido para la clasificación representa la diferencia máxima permitida entre la firma del *endmember* de referencia y la firma de un píxel para clasificarlo como tal. Cuanto más bajo sea este umbral de clasificación, más precisa será esta. Al ejecutar el algoritmo, se obtienen también los valores en radianes de la diferencia de cada píxel clasificado con respecto a la firma temporal de referencia. De nuevo, valores bajos indican un grado alto de exactitud y, por tanto, de seguridad en la identificación del píxel como una cubierta u otra.

Con el objeto de conocer el grado de precisión que demuestra el método de clasificación en este caso concreto, se validan los resultados de dos formas distintas. En primer lugar, se realiza una validación con los propios puntos conocidos. Es decir, con los que han intervenido en todo el proceso de extracción y tratamiento de datos.

En segundo lugar, se aplica una validación externa a partir de los datos obtenidos de 42 puntos externos, de los cuales se conoce el tipo de pasto que cubre la superficie del píxel correspondiente. Esta segunda validación ha sido posible gracias a la aportación los nuevos datos en 42 puntos reconocidos mediante trabajo de campo por parte de la Dra. Maite Gartzia, quién forma parte del equipo investigador que integra PROPAST y es una experta en todo lo referente a los pastos y su distribución en esta área de estudio.



## 4. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a razón de la aplicación del proceso metodológico expuesto en el epígrafe anterior. Dichos resultados se muestran en concordancia con los objetivos definidos al inicio de este documento y con las propias etapas de la metodología elaborada. De esta manera, se presentan los siguientes tres subapartados de resultados:

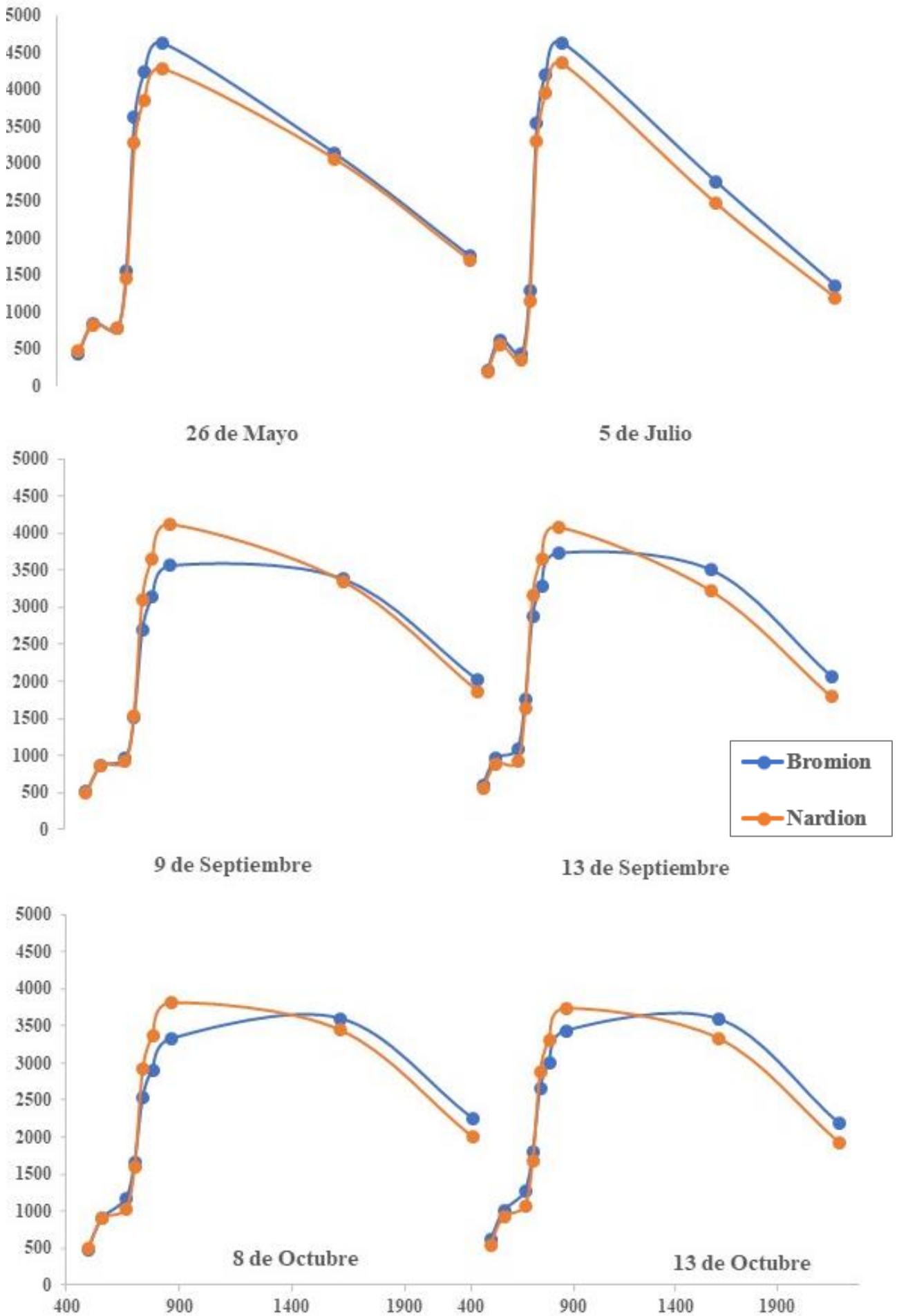
### 4.1. Fenología de *Bromion erecti* y *Nardion strictae*

La extracción de los valores de los píxeles coincidentes con los puntos correspondientes a las parcelas de estudio de PROPAST permitió organizar toda la información espectral de cada imagen Sentinel-2 para cada punto de manera continua, contando con todas las bandas del espectro electromagnético. Es decir, con estos valores de reflectividad, es posible obtener las firmas espectrales de la cubierta existente en cada punto y, por tanto, la firma espectral media de las dos especies de estudio, puesto que, gracias a los aportes de PROPAST, se conoce la verdad-terreno de cada uno de los puntos de estudio y la especie o comunidad que domina en cada una de las parcelas.

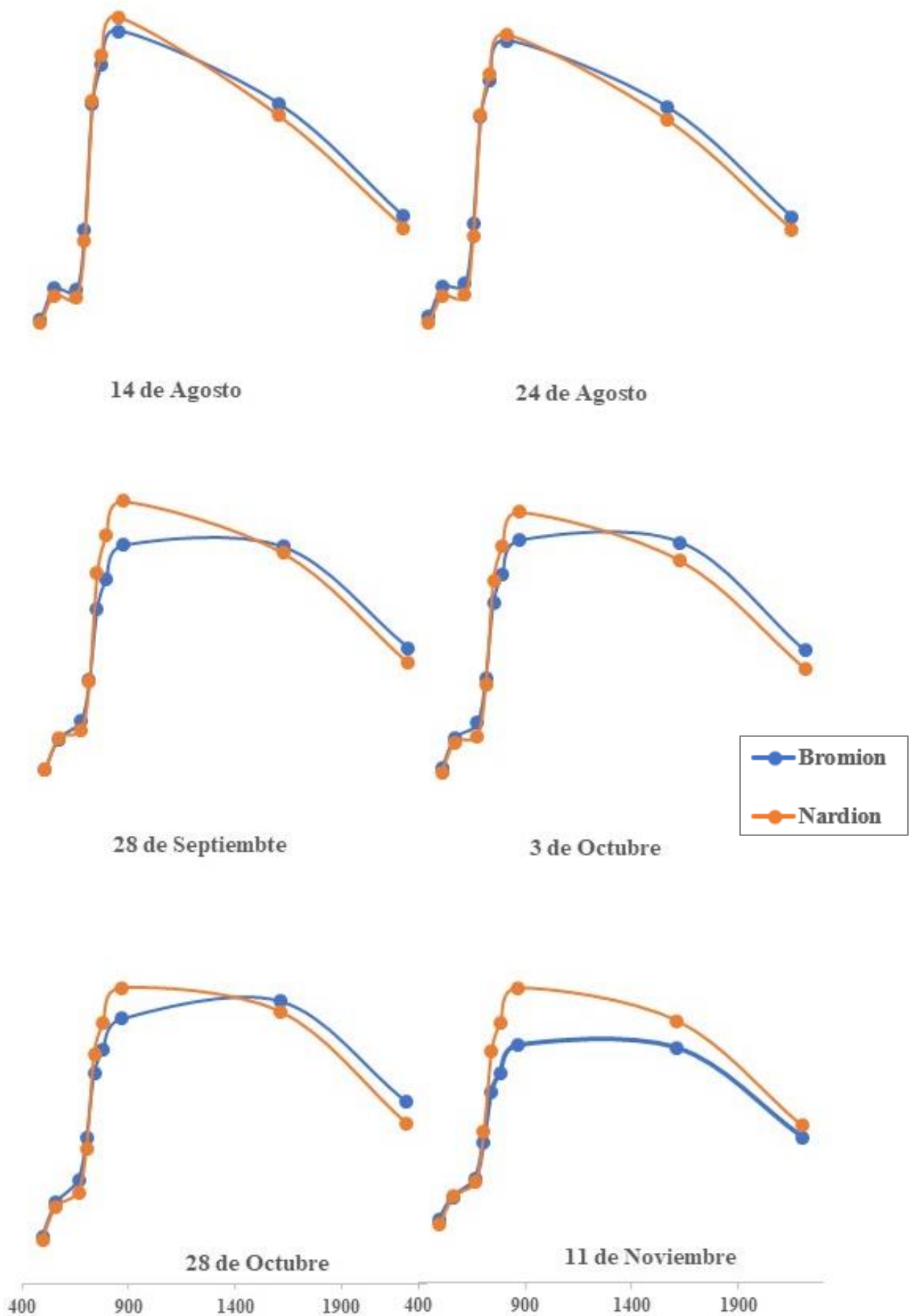
Se presentan en el anexo, pues, los resultados obtenidos del procedimiento de análisis y organización de los datos Sentinel-2 de la zona de estudio, en forma de 12 gráficos de firma espectral media de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* para cada una de las doce fechas con las que se ha trabajado.

Para toda la serie de gráficos de firmas espectrales de los dos tipos de pasto estudiados, el eje de las X expresa los valores de reflectividad sin influencia de la atmósfera (BOA) en tantos por diez mil (‰) de cada una de las dos comunidades. Por otra parte, el eje Y representa la longitud de onda del espectro electromagnético, en nanómetros. Cada uno de los puntos marcados sobre las propias firmas espectrales enuncia el valor de reflectividad de *Bromion erecti* o *Nardion strictae* para cada una de las bandas de Sentinel-2 en las que se tiene información, quedando ordenadas de la siguiente forma: B02, B03, B04, B05, B06, B07, B8A, B11 y B12.

Para refrendar estos resultados y ofrecer una visión general, incorporando la dimensión temporal, de esta dinámica fenológica de ambos pastos, se presenta una única imagen que integra la evolución de las dos firmas espectrales de referencia a lo largo de todo el año 2017, pudiendo observarse la variabilidad espectral sufrida por ambas especies a lo largo del tiempo (Figura 10).



**Figura 10.** Evolución de la reflectividad (%) de ambas especies a lo largo del año 2017.



**Figura 10 (continuación).** Evolución de la reflectividad (%) de ambas especies a lo largo del año 2017.

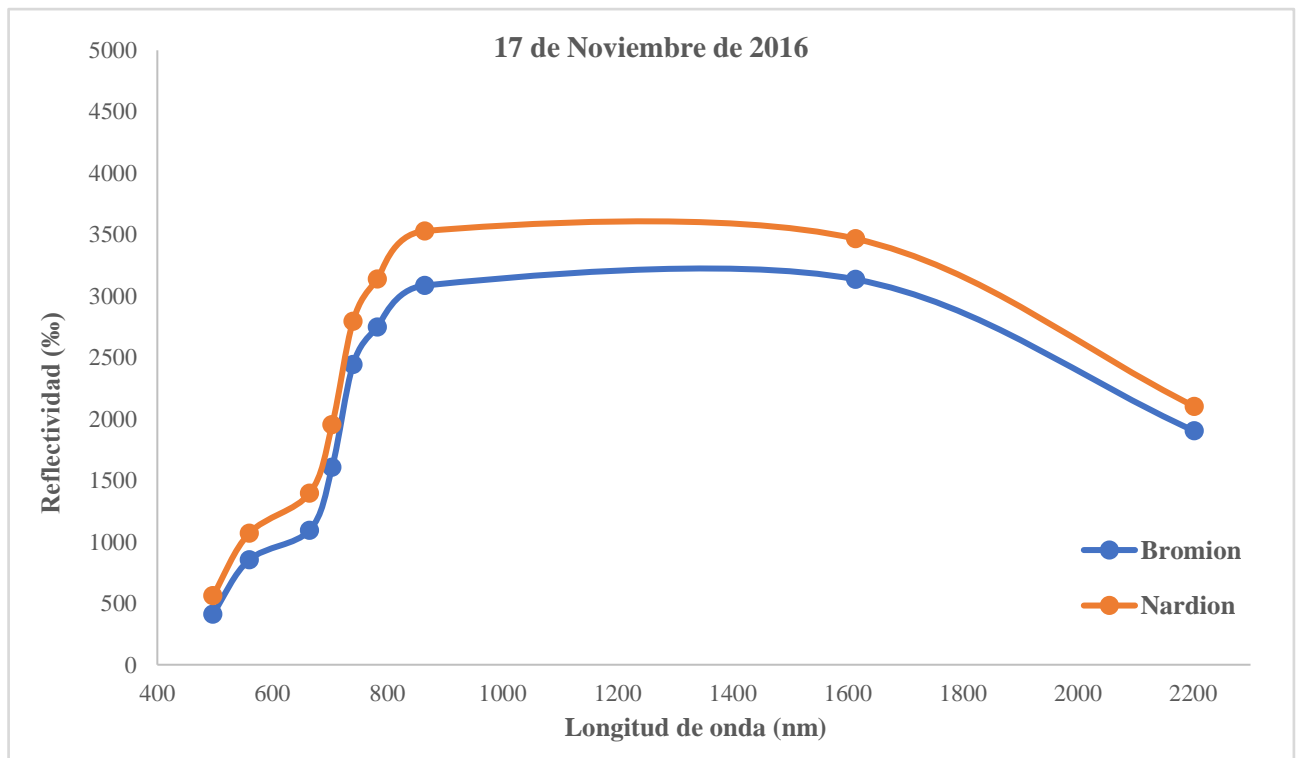
Únicamente realizando una somera observación de los gráficos aquí expuestos, es posible apreciar varios detalles que precipitan un primer análisis acerca del comportamiento espectral de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* en la zona de estudio. En primer lugar, queda corroborada la suposición inicial de que estas dos comunidades pastables son prácticamente idénticas, pues, tal y como puede verse en la serie gráfica, los valores de reflectividad de ambas son muy similares en todas las regiones del espectro, con especial semejanza en la región del visible (bandas B02, B03 y B04).

No obstante, en segundo lugar, también se pueden percibir ciertas diferencias en la serie de firmas espectrales. Especialmente en las bandas del NIR y del RE se puede captar una notable separación de las dos firmas espectrales a partir de un determinado momento de la serie temporal. Efectivamente, la reflectividad del *Bromion erecti* sufre una caída en sus valores medios comparado con el *Nardion strictae* en las bandas mencionadas desde el final del verano y el principio del otoño hasta el final de la serie. Este hecho puede sentar las bases de una clasificación precisa en el caso de que estas diferencias, apreciadas en el análisis gráfico de la reflectividad de las dos especies, sean significativas estadísticamente hablando.

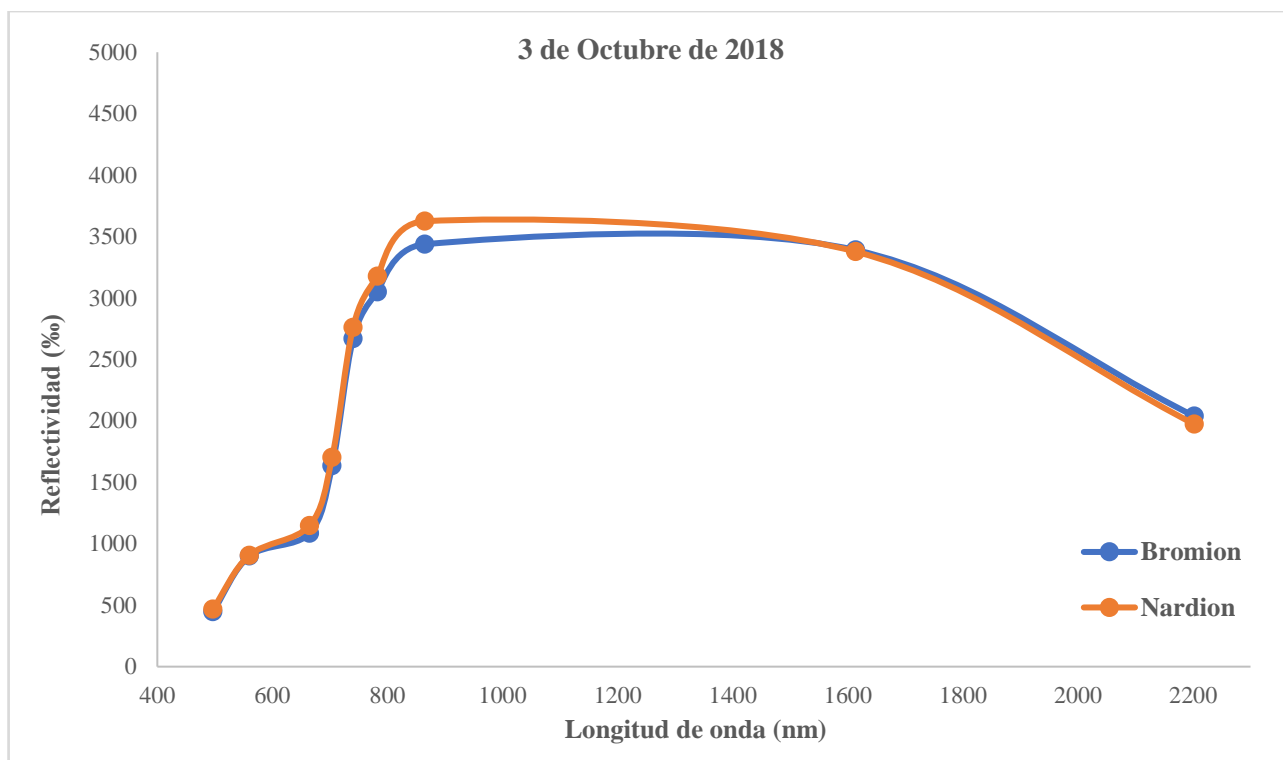
Ante la posible consideración de estas diferencias como casuales, aleatorias o fruto de la casuística climática de esta serie temporal en concreto (2017), se comprueba que este fenómeno no es una eventualidad aislada, sino que se repite en otras fechas similares de otros años (2016 y 2018). Se muestran como ejemplo, las firmas espectrales medias de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* en las fechas del 17 de noviembre de 2016 y del 3 de octubre de 2018.

En la primera de ellas (Figura 11), es posible comprobar la similitud con las firmas de la última imagen de la serie temporal de 2017 (11 de noviembre de 2017), apreciándose claramente una diferencia creciente en las bandas de las regiones del RE y del NIR.

Asimismo, en el caso de las firmas de *Bromion* y *Nardion* el 3 de octubre de 2018 (Figura 12), se vuelven a observar esas diferencias características ya entre la respuesta espectral de los dos tipos de pasto. Si bien es cierto que estas parecen menores, queda corroborada la tendencia temporal señalada previamente.



**Figura 11.** Signatura espectral de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* el 17 de noviembre de 2016.



**Figura 12.** Signatura espectral de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* el 17 de noviembre de 2016.

En conclusión, es posible afirmar que, pese a que ambas especies de pasto presentan signaturas espectrales muy similares a lo largo de todo su ciclo fenológico; existen diferencias marcadas por el pronto agostamiento del *Bromion erecti*. Es decir, se observa como esta comunidad pastable sufre una pérdida de vigor vegetal mayor y anterior al *Nardion strictae*.

#### 4.2. Selección estadística de información espectral para la clasificación supervisada

Fruto del tratamiento estadístico de los datos extraídos de los productos Sentinel-2, se obtienen diversos resultados sobre los que sentar las bases de una clasificación precisa. Es decir, la interpretación de los resultados estadísticos derivados del análisis aplicado permitirá la selección de aquellas variables idóneas para ejecutar los procedimientos de clasificación, ya sean fechas concretas, bandas a lo largo de la serie temporal o índices también a lo largo de la serie temporal.

Los primeros resultados obtenidos del estudio estadístico de los datos son las tablas que expresan la normalidad o no-normalidad de las distintas series de datos de cada banda y de cada índice de vegetación, respectivamente, en cada una de las doce fechas consideradas (incluidas en el Anexo).

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.2., al no obtener un resultado común de normalidad o no a todas las series de datos, se opta por realizar dos tipos de análisis estadísticos: un Análisis de la Varianza o ANOVA para aquellas series de datos que sí presentan una distribución normal y una Prueba U de Mann-Whitney para aquellas que no. El objetivo de ambos análisis es averiguar la existencia o no de diferencias significativas entre los datos pertenecientes a *Bromion erecti* y *Nardion strictae*. El valor estadístico que indica esta significación es, en ambos casos, el valor de significación (“sig.”) obtenido en el proceso. En este caso, un valor superior a 0.05 revelará la significación entre ambas especies y por tanto la no existencia de diferencias significativas. Por tanto, valores inferiores o iguales a 0.05 harán considerar esa banda/índice como representativa de la existencia de diferencias significativas entre los valores de las dos comunidades de pasto objeto de estudio.

Los resultados de la aplicación de ambos procedimientos son las siguientes tablas en las que se muestra el valor de “sig.” obtenido en cada caso. Dicho valor corresponde bien al resultante del análisis ANOVA o al obtenido de la aplicación de la prueba U de Mann-Whitney en función de la existencia o no de normalidad en la distribución de los datos. En negrita, se señalan aquellos valores que expresan la existencia de diferencias significativas entre ambas comunidades de pasto.

**Tabla 3.** Valor de significación estadística para cada banda y cada fecha.

Fecha	26/05/2017	05/07/2018	14/08/2017	24/08/2017	08/09/2017	13/09/2018
<b>B02</b>	0,190	0,631	0,116	<b>0,002</b>	0,397	0,051
<b>B03</b>	0,426	<b>0,004</b>	<b>0,010</b>	<b>0,000</b>	0,417	<b>0,024</b>
<b>B04</b>	0,730	0,088	<b>0,010</b>	<b>0,002</b>	0,397	<b>0,006</b>
<b>B05</b>	<b>0,011</b>	<b>0,000</b>	<b>0,014</b>	<b>0,001</b>	0,450	<b>0,021</b>
<b>B06</b>	<b>0,000</b>	<b>0,012</b>	0,551	0,334	<b>0,000</b>	<b>0,015</b>
<b>B07</b>	<b>0,000</b>	<b>0,024</b>	0,202	0,455	<b>0,000</b>	<b>0,008</b>
<b>B8A</b>	<b>0,001</b>	<b>0,021</b>	0,140	0,537	<b>0,000</b>	<b>0,017</b>
<b>B11</b>	0,176	<b>0,000</b>	<b>0,010</b>	<b>0,056</b>	0,691	<b>0,000</b>
<b>B12</b>	0,217	<b>0,002</b>	<b>0,005</b>	<b>0,011</b>	0,330	<b>0,000</b>
Fecha	28/09/2017	03/10/2017	08/10/2017	13/10/2017	28/10/2017	12/11/2017
<b>B02</b>	0,907	<b>0,027</b>	0,956	<b>0,006</b>	0,817	0,596
<b>B03</b>	0,341	0,052	0,767	<b>0,009</b>	0,553	0,401
<b>B04</b>	0,085	<b>0,000</b>	0,114	<b>0,000</b>	0,116	0,799
<b>B05</b>	0,647	0,074	0,544	<b>0,041</b>	0,256	0,306
<b>B06</b>	<b>0,000</b>	<b>0,016</b>	<b>0,000</b>	0,052	0,052	<b>0,002</b>
<b>B07</b>	<b>0,000</b>	<b>0,012</b>	<b>0,000</b>	<b>0,028</b>	<b>0,014</b>	<b>0,001</b>
<b>B8A</b>	<b>0,000</b>	<b>0,022</b>	<b>0,000</b>	<b>0,045</b>	<b>0,011</b>	<b>0,001</b>
<b>B11</b>	0,401	<b>0,009</b>	0,287	<b>0,014</b>	0,370	0,058
<b>B12</b>	<b>0,012</b>	<b>0,000</b>	0,089	<b>0,000</b>	<b>0,049</b>	0,167

**Tabla 4.** Valor de significación estadística para cada índice y cada fecha.

Fecha	26/05/2017	05/07/2018	14/08/2017	24/08/2017	08/09/2017	13/09/2018
<b>NDVI</b>	0,070	0,893	<b>0,003</b>	<b>0,017</b>	<b>0,010</b>	<b>0,001</b>
<b>NBR</b>	0,202	0,467	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>MCARI2</b>	0,106	0,905	<b>0,001</b>	<b>0,004</b>	<b>0,003</b>	<b>0,000</b>
<b>MTVI2</b>	0,070	0,905	<b>0,003</b>	<b>0,017</b>	<b>0,010</b>	<b>0,001</b>
<b>MTCI</b>	<b>0,000</b>	0,313	0,425	0,212	<b>0,004</b>	<b>0,000</b>
<b>S2REP</b>	<b>0,001</b>	0,494	<b>0,005</b>	<b>0,816</b>	<b>0,033</b>	<b>0,018</b>
<b>IRECI</b>	<b>0,026</b>	<b>0,035</b>	<b>0,005</b>	<b>0,018</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Fecha	28/09/2017	03/10/2017	08/10/2017	13/10/2017	28/10/2017	12/11/2017
<b>NDVI</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>NBR</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>MCARI2</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>MTVI2</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

<b>MTCI</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,034</b>	<b>0,000</b>
<b>S2REP</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	0,117	<b>0,030</b>
<b>IRECI</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

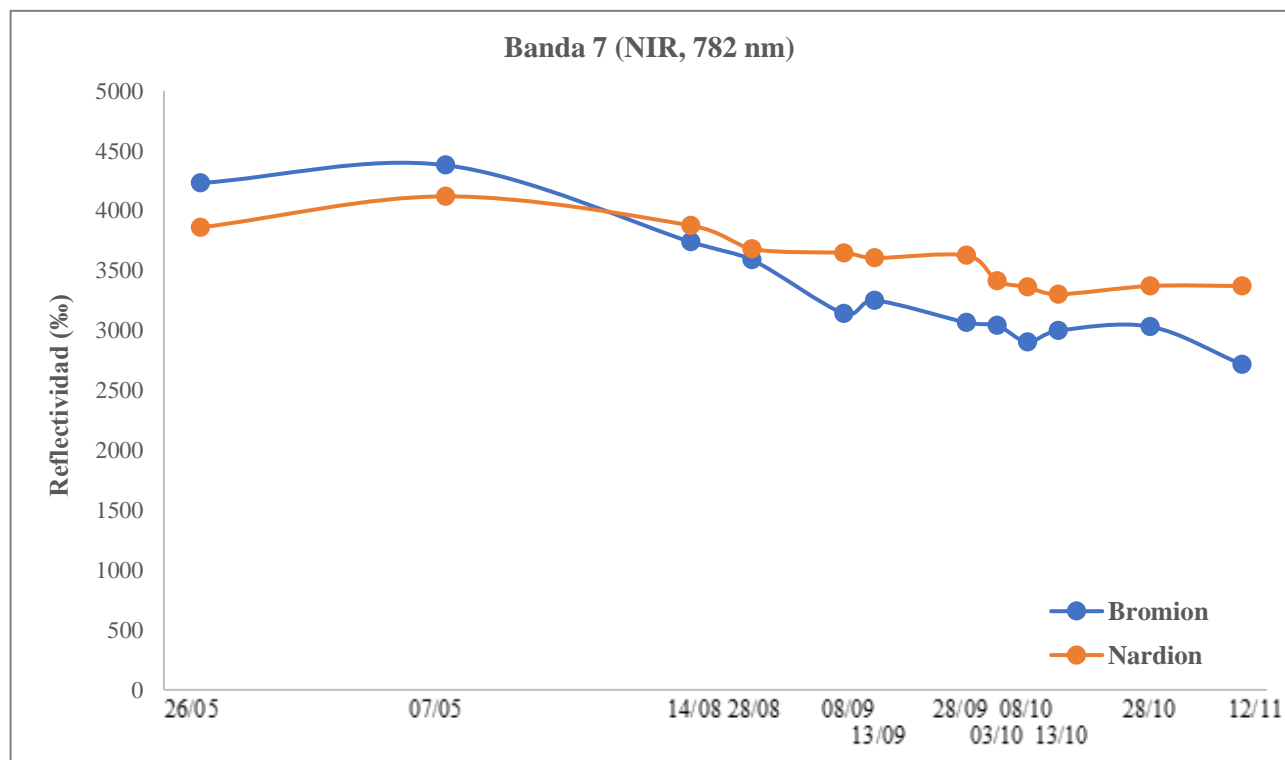
Observando ambas tablas, se ponen de manifiesto una serie de cuestiones clave de cara al proceso de clasificación:

- Las bandas en las que existen diferencias significativas a lo largo de prácticamente toda la serie temporal considerada son las bandas B06, B07 y B8A, correspondientes a las regiones espectrales del RE y del NIR. Estos datos corroboran la apreciación extraída del análisis de las firmas espectrales y el ciclo fenológico de las dos especies.
- La mayoría de los índices de vegetación calculados acentúan las diferencias significativas entre las dos especies, pues utilizan precisamente las bandas que mejor representan estas diferencias.
- La fecha en la que las dos comunidades son espectralmente más desiguales es el trece de septiembre.
- Las fechas del 25 de mayo y del 5 de Julio presentan unas estadísticas de significación muy desfavorables, por lo que serán excluidas de los procedimientos de clasificación.

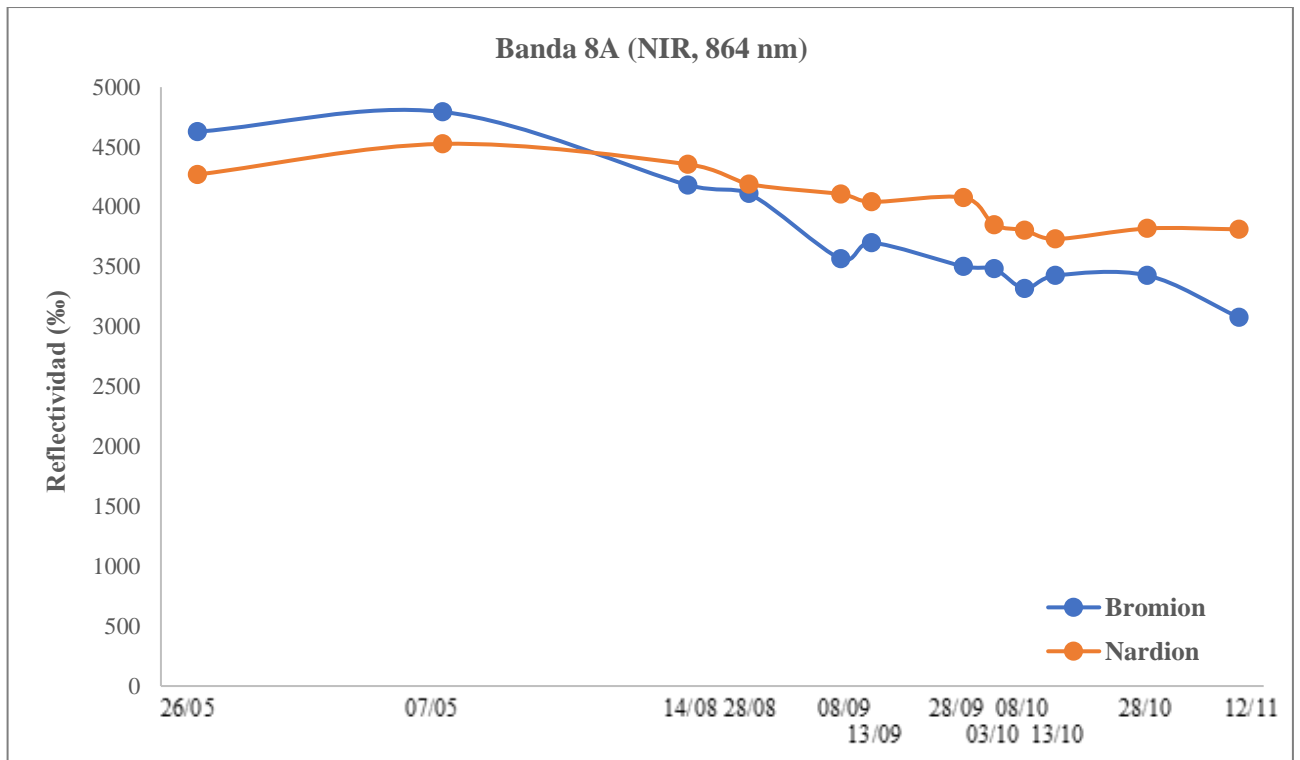
Estas afirmaciones suponen la base de las decisiones que se deben tomar al respecto del proceso de clasificación que se va a llevar a cabo. Es decir, se va a realizar una selección de variables sobre las que realizar la clasificación en función de la pertinencia estadística que hayan demostrado dichas variables.

En primer lugar, se selecciona la imagen del 9 de septiembre de 2017 como referencia sobre la que aplicar la clasificación multiespectral sobre una única fecha mediante SAM, puesto que los resultados estadísticos en cuanto a diferencia significativa entre la reflectividad de las dos comunidades pastantes son immaculados. Presenta diferencias en todas las regiones del espectro electromagnético excepto en la banda B02, correspondiente al azul. La signature espectral de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* para esta fecha concreta se puede observar en el anexo.

Asimismo, se seleccionan las bandas B8A y B07, pertenecientes a la región del NIR, como objetos de clasificación utilizando SAM, ya que señalan la existencia de diferencias significativas en ambas bandas para todas las fechas salvo dos.



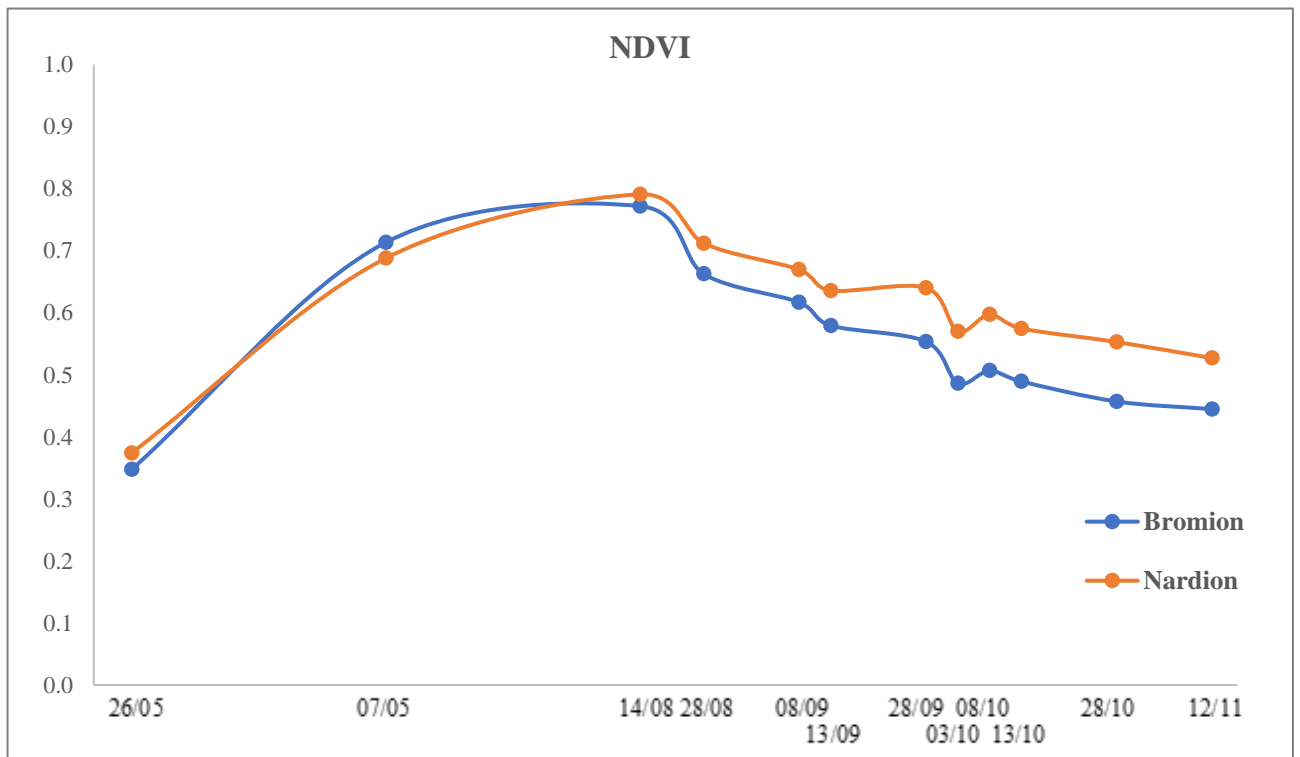
**Figura 13.** Evolución de la reflectividad de la Banda 7 a lo largo de la serie temporal.



**Figura 14.** Evolución de la reflectividad de la Banda 8A a lo largo de la serie temporal.

De la misma manera, los índices elegidos como objeto de clasificación son los siguientes: NDVI, MCARI2 e IRECI.

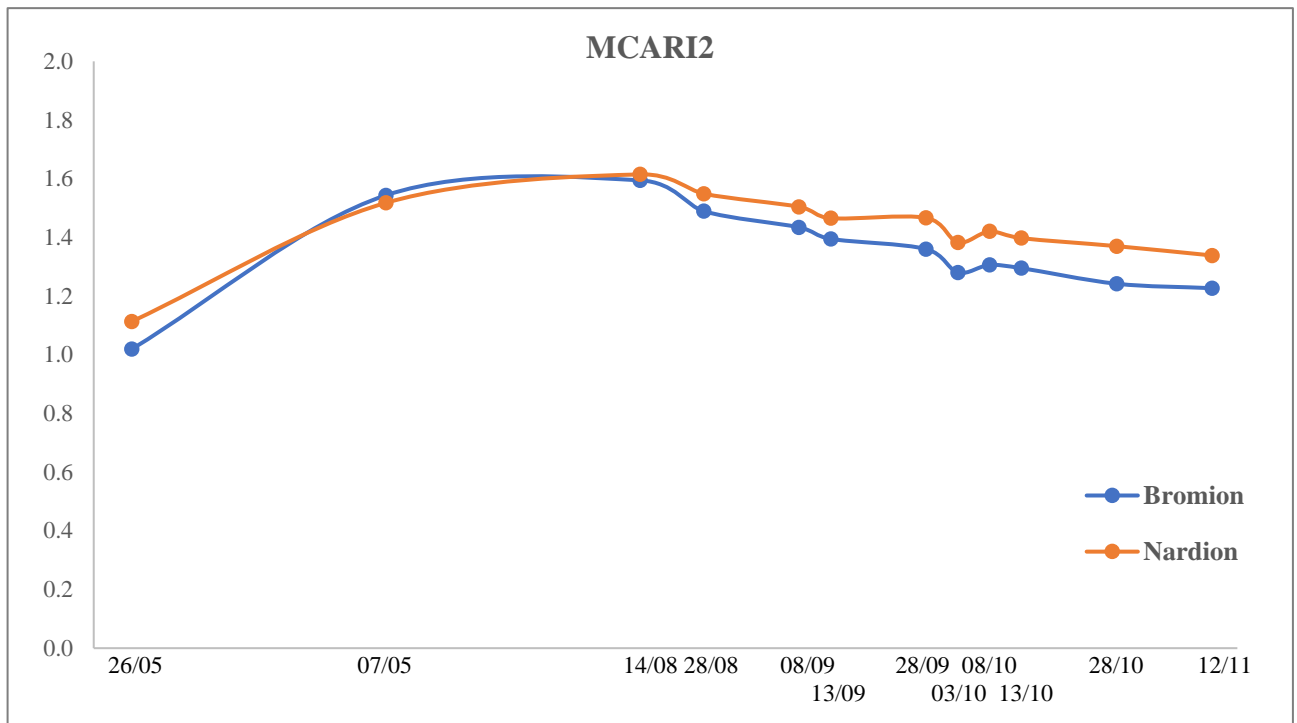
El índice NDVI es elegido por ser el más utilizado en el estudio de variables de vegetación mediante técnicas de teledetección. Esto permite realizar comparaciones con otros estudios similares. Además, en este caso particular, el índice ha demostrado una buena respuesta a las operaciones estadísticas a las que ha sido sometido, aportando diferencias significativas entre *Bromion erecti* y *Nardion strictae* en todas las fechas salvo en las dos mencionadas previamente.



**Figura 15.** Evolución de los valores del índice NDVI a lo largo de la serie temporal.

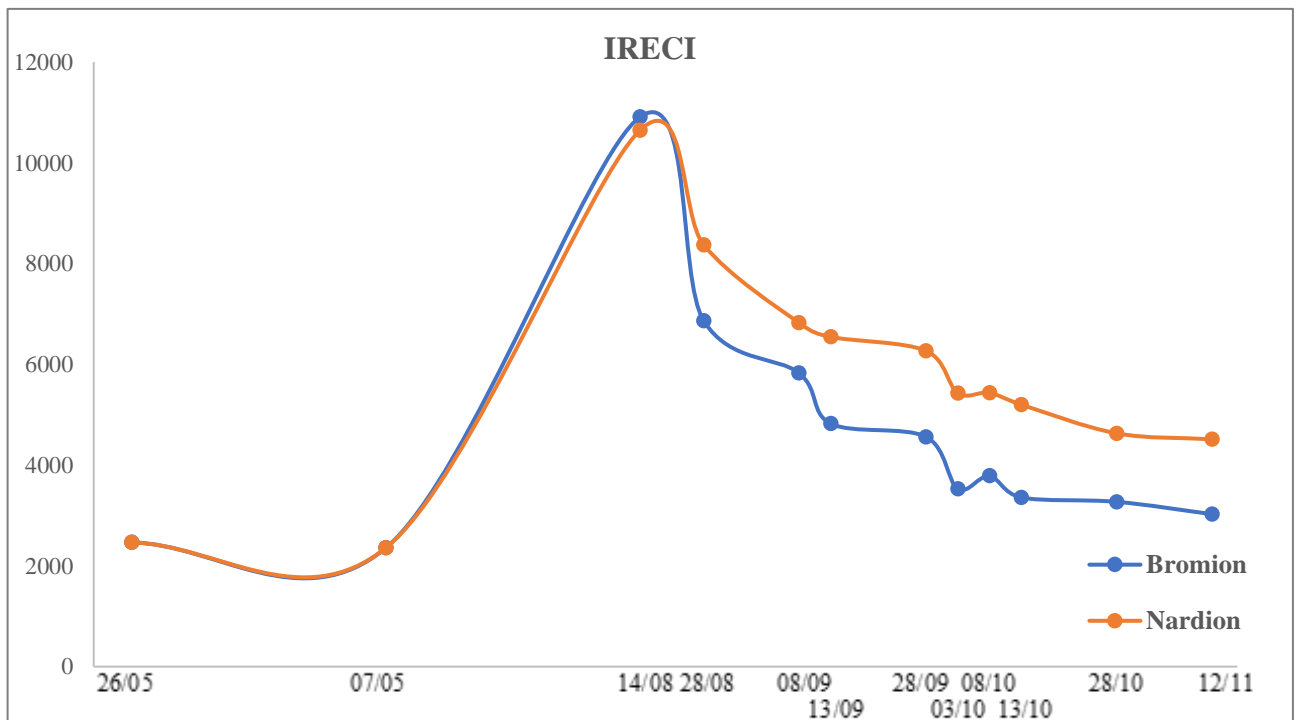


MCARI2 es seleccionado debido, principalmente, a la importancia que la bibliografía le otorga a este índice. Es señalado como un índice muy preciso para determinar el contenido de clorofila de la vegetación y para relacionarlo con otros parámetros asociados a ella, como el Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*, LAI) (Haboudane *et al*, 2004). Al igual que en el caso anterior, también presenta diferencias significativas entre las dos especies de pastos en todas las fechas de estudio, salvo en las dos primeras, como se puede observar en la Tabla 4.



**Figura 16.** Evolución de los valores del índice MCARI2 a lo largo de la serie temporal.

Por último, también es elegido el índice IRECI, puesto que ha resultado ser el que mejor caracteriza las diferencias espectrales entre las dos comunidades de pasto estudiadas, estadísticamente hablando.



**Figura 17.** Evolución de los valores del índice IRECI a lo largo de la serie temporal.

Por tanto, son descartados los otros cuatro índices considerados. Los índices MTCI y S2REP presentan “lagunas” en sus diferencias significativas entre las especies a lo largo de la serie temporal, por lo que podrían causar una clasificación menos precisa. Por otro lado, el índice MTVI2 ha sido descartado por su alta correlación y similitud con MCARI2, ya que su formulación matemática es idéntica (Nguy-Robertson, 2013).

Asimismo, se selecciona la imagen multiespectral del trece de septiembre de 2017 para realizar una clasificación supervisada multiespectral tradicional. No obstante, cabe destacar que la elección de esta fecha no es casual, sino que responde al resultado del exhaustivo análisis temporal realizado previamente para identificar las variaciones y dinámicas del ciclo fenológico de *Bromion erecti* y *Nardion strictae*. Esto puede considerarse como un ejemplo del salto cualitativo que supone la inclusión del enfoque multitemporal en este tipo de estudios.

### 4.3. Clasificación de la zona de estudio

Tal y como se ha expuesto previamente en el apartado 3.3. de este documento, el método elegido para ejecutar los procedimientos de clasificación de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* en la zona de estudio es SAM (*Spectral Angle Mapper*).

SAM ha sido el método seleccionado para realizar la clasificación en este caso debido, precisamente, a que se ajusta a los requerimientos técnicos que presentan estos datos. Además, SAM es considerado como un método fácil de aplicar, rápido y muy efectivo, ya que reprime la influencia de los efectos de sombras y valores anómalos en los píxeles de las imágenes (De Carvalho y Meneses, 2000; Girouard *et al.*, 2004). El principal inconveniente que presenta este algoritmo de clasificación es la asunción de que los *endmembers* definidos representan la firma espectral o temporal más pura posible de la cubierta de referencia (Girouard *et al.*, 2004).

Para proceder con la clasificación, SAM requiere de la definición de tantos *endmembers* de referencia como se quieran clasificar, y de un parámetro de ángulo máximo, en radianes, con el que operar. Es decir, el usuario debe decidir qué umbral de exactitud desea en su clasificación, restringiendo la posibilidad de que la firma de un píxel que exceda el ángulo de diferencia con la referencia en el valor dado sea clasificada como tal. En este estudio se han aplicado las clasificaciones deseadas con tres valores de ángulo máximo diferentes, a saber: 0.1, 0.07 y 0.05. De esta manera, será posible conocer el comportamiento real de cada sujeto de clasificación al ver la evolución del acierto que presente conforme vaya disminuyendo el ángulo máximo para clasificarlo como *Bromion erecti* o *Nardion strictae*.

A continuación, se muestran tres tablas que resumen el comportamiento de cada una de las variables tras aplicar el algoritmo de SAM con cada uno de los valores de ángulo máximo determinados:

**Tabla 5.** Resultados generales de clasificación 0.1 radianes

Variable	$\bar{x}$ Rule <i>Bromion</i> (radianes)	$\bar{x}$ Rule <i>Nardion</i> (radianes)	Acierto <i>Bromion</i> (%)	Acierto <i>Nardion</i> (%)	Acierto total (%)	Índice de Kappa
<b>13/09</b>	<b>0.091</b>	<b>0.081</b>	<b>65.517</b>	<b>75.758</b>	<b>70.968</b>	<b>0.434</b>
<b>B07</b>	0.090	0.083	20.690	75.758	50.000	0.077
<b>B8A</b>	0.087	0.079	24.138	81.818	54.839	0.150
<b>NDVI</b>	0.057	0.062	72.414	36.364	53.226	0.145
<b>MCARI2</b>	<b>0.036</b>	<b>0.032</b>	<b>51.724</b>	<b>81.818</b>	<b>67.742</b>	<b>0.373</b>
<b>IRECI</b>	0.139	0.142	10.345	15.152	12.903	-0.063

**Tabla 6.** Resultados generales de clasificación 0.07 radianes

Variable	$\bar{x}$ Rule <i>Bromion</i> (radianes)	$\bar{x}$ Rule <i>Nardion</i> (radianes)	Acierto <i>Bromion</i> (%)	Acierto <i>Nardion</i> (%)	Acierto total (%)	Índice de Kappa
<b>13/09</b>	<b>0.091</b>	<b>0.081</b>	<b>10.345</b>	<b>24.242</b>	<b>17.742</b>	<b>-0.316</b>
<b>B07</b>	0.090	0.083	20.690	57.576	40.323	0.066
<b>B8A</b>	0.087	0.079	17.241	63.636	41.935	0.072
<b>NDVI</b>	0.057	0.062	34.483	12.121	22.581	-0.260
<b>MCARI2</b>	<b>0.036</b>	<b>0.032</b>	<b>51.724</b>	<b>78.788</b>	<b>66.129</b>	<b>0.349</b>
<b>IRECI</b>	0.139	0.142	24.138	0.000	11.290	0.024

**Tabla 7.** Resultados generales de clasificación 0.05 radianes

Variable	$\bar{x}$ Rule <i>Bromion</i> (radianes)	$\bar{x}$ Rule <i>Nardion</i> (radianes)	Acierto <i>Bromion</i> (%)	Acierto <i>Nardion</i> (%)	Acierto total (%)	Índice de Kappa
<b>13/09</b>	<b>0.091</b>	<b>0.081</b>	<b>6.897</b>	<b>24.242</b>	<b>16.129</b>	<b>-0.192</b>
<b>B07</b>	0.090	0.083	10.345	15.152	12.903	0.009
<b>B8A</b>	0.087	0.079	6.897	9.091	8.065	-0.024
<b>NDVI</b>	0.057	0.062	41.379	27.273	33.871	0.051
<b>MCARI2</b>	<b>0.036</b>	<b>0.032</b>	<b>48.276</b>	<b>72.727</b>	<b>61.290</b>	<b>0.290</b>
<b>IRECI</b>	0.139	0.142	6.897	0.000	3.226	-0.007

Tal y como se puede apreciar en la serie de tablas, la mejor clasificación obtenida es la realizada a partir de la imagen del 13 de septiembre, utilizando un ángulo máximo de 0.10 radianes. Si bien esto es cierto, también se observa que la calidad de la clasificación utilizando esta variable desciende en picado conforme aplicamos un valor de ángulo máximo más restrictivo. Esto se debe, principalmente, a que, en los píxeles que SAM ha clasificado, lo ha hecho con una separación media de la firma de referencia de 0.091 para *Bromion erecti* y de 0.081 para *Nardion strictae*. Por tanto, ante estos valores medios, es normal que, en cuanto se aplica un ángulo máximo inferior, el algoritmo deje sin clasificar la gran mayoría de píxeles. El otro objeto de clasificación que destaca por encima del resto en cuanto a la obtención de buenos resultados de acierto en la clasificación es el índice MCARI2. Pese a tener unos valores de acierto más bajos que la imagen multiespectral del 13 de septiembre cuando el umbral es menos estricto (0.1 radianes), presenta un mejor porcentaje cuando este valor desciende. Esto se debe a que, tal y como podemos ver en las tablas, los valores de ángulo espectral con los que SAM clasifica esta variable son muy bajos (0.036 para el *Bromion* y 0.032 para el *Nardion*), lo que indica un grado de similitud casi total entre las firmas temporales de referencia y las de cada píxel clasificado.

En el apartado 3.3 de la sección de Metodología del presente documento, se ha indicado que el proceso de validación se iba a completar con una validación externa en una serie de píxeles no pertenecientes a las parcelas de estudio que han sido usadas como entrenamiento durante todo el proceso. Esta segunda validación se ha realizado únicamente sobre las dos variables que mejores resultados han ofrecido en la primera de ellas: la imagen multiespectral Sentinel-2 del 13 de septiembre y el multibanda multitemporal de la evolución del índice MCARI2.

**Tabla 8.** Resultados de la segunda validación de la clasificación 0.1 radianes

Variable	$\bar{x}$ Rule <i>Bromion</i> (radianes)	$\bar{x}$ Rule <i>Nardion</i> (radianes)	Acierto <i>Bromion</i> (%)	Acierto <i>Nardion</i> (%)	Acierto total (%)	Índice de Kappa
13/09	0.091	0.081	52.381	95.238	73.810	0.551
MCARI2	0.036	0.032	38.095	71.429	54.762	0.191

**Tabla 9.** Resultados de la segunda validación de la clasificación 0.07 radianes

Variable	$\bar{x}$ Rule <i>Bromion</i> (radianes)	$\bar{x}$ Rule <i>Nardion</i> (radianes)	Acierto <i>Bromion</i> (%)	Acierto <i>Nardion</i> (%)	Acierto total (%)	Índice de Kappa
13/09	0.091	0.081	28.571	80.952	54.762	0.345
MCARI2	0.036	0.032	38.095	71.429	54.762	0.116

**Tabla 10.** Resultados de la segunda validación de la clasificación 0.05 radianes

Variable	$\bar{x}$ Rule <i>Bromion</i> (radianes)	$\bar{x}$ Rule <i>Nardion</i> (radianes)	Acierto <i>Bromion</i> (%)	Acierto <i>Nardion</i> (%)	Acierto total (%)	Índice de Kappa
13/09	0.091	0.081	28.571	57.143	42.857	0.250
MCARI2	0.036	0.032	38.095	71.429	54.762	0.095

Las tendencias detectadas en el análisis de la primera validación siguen vigentes en esta segunda. La imagen multiespectral clasifica mejor con un ángulo máximo menos estricto, mientras que MCARI2 muestra resultados más constantes en todos los niveles de restricción aplicados. Este índice clasifica, como ya se ha comentado previamente, con unos valores *rule* medios muy bajos (0.036 para *Bromion* y 0.032 para *Nardion*), lo que implica una precisión máxima en la definición de los píxeles del multibanda como pertenecientes a una cubierta u otra. Además, dentro de lo que cabe, se observa un mayor equilibrio entre la clasificación de las dos especies al utilizar MCARI2, pues la imagen multiespectral presenta valores de acierto muy elevados en el *Nardion* y valores mucho más bajos en el *Bromion*, mientras que MCARI2 es más equilibrado en esta faceta.

Si atendemos al estadístico de Kappa, los resultados de la clasificación, tanto en la primera como en la segunda validación, SAM son exiguos, tal y como demuestra este indicador. Valores inferiores a 0.2 indican una fuerza de la concordancia pobre y este es el caso de la gran mayoría de los procesos de clasificación efectuados, si bien es cierto que este indicador penaliza los valores que pueden considerarse asignados aleatoriamente que, en este caso, podrían existir únicamente donde los valores *rule* sean elevados.

Sin embargo, los niveles de acierto para la imagen multiespectral con un umbral de 0.1 radianes se sitúan por encima del 70%. Por su parte, el acierto de MCARI2 es siempre superior al 50%, incluso cuando el ángulo espectral máximo es muy estricto (0.05 radianes).

En el caso concreto de este estudio, la posible explicación al hecho de no haber obtenido unos acuerdos en la clasificación superiores al umbral marcado por el estadístico de Kappa (0.6) para considerar un acuerdo moderado en los valores; no se debe a la elección de este método por encima de otros, sino que responde, básicamente, a la dificultad de discriminación entre dos comunidades vegetales tan parecidas fisiológica y espectralmente.

Teniendo en consideración estas dificultades que presenta el objeto de estudio de por sí, es posible explorar otras opciones en busca de obtener resultados más precisos.

La primera de ellas podría ser la utilización de productos hiperespectrales. Pese a que Sentinel-2 ha supuesto una gran evolución en cuanto al uso de datos de teledetección multiespectrales (aun incorporando la perspectiva multitemporal) con respecto a otras plataformas (Red Edge, más bandas en el

NIR...), no se puede comparar a la cantidad de variables que se pueden tener en cuenta en el tratamiento de productos hiperespectrales. De hecho, algunos estudios han indagado en esta dirección, obteniendo buenos resultados en clasificaciones de tipos de pasto (Dale *et al.*, 2013; Lopatin *et al.*, 2017). Además, en este sentido, las futuras misiones *EnMAP* o *HysPIRI*, actualmente en fase de prelanzamiento, suponen una interesante oportunidad ya que proporcionarán información hiperespectral con una adecuada resolución espacial y temporal.

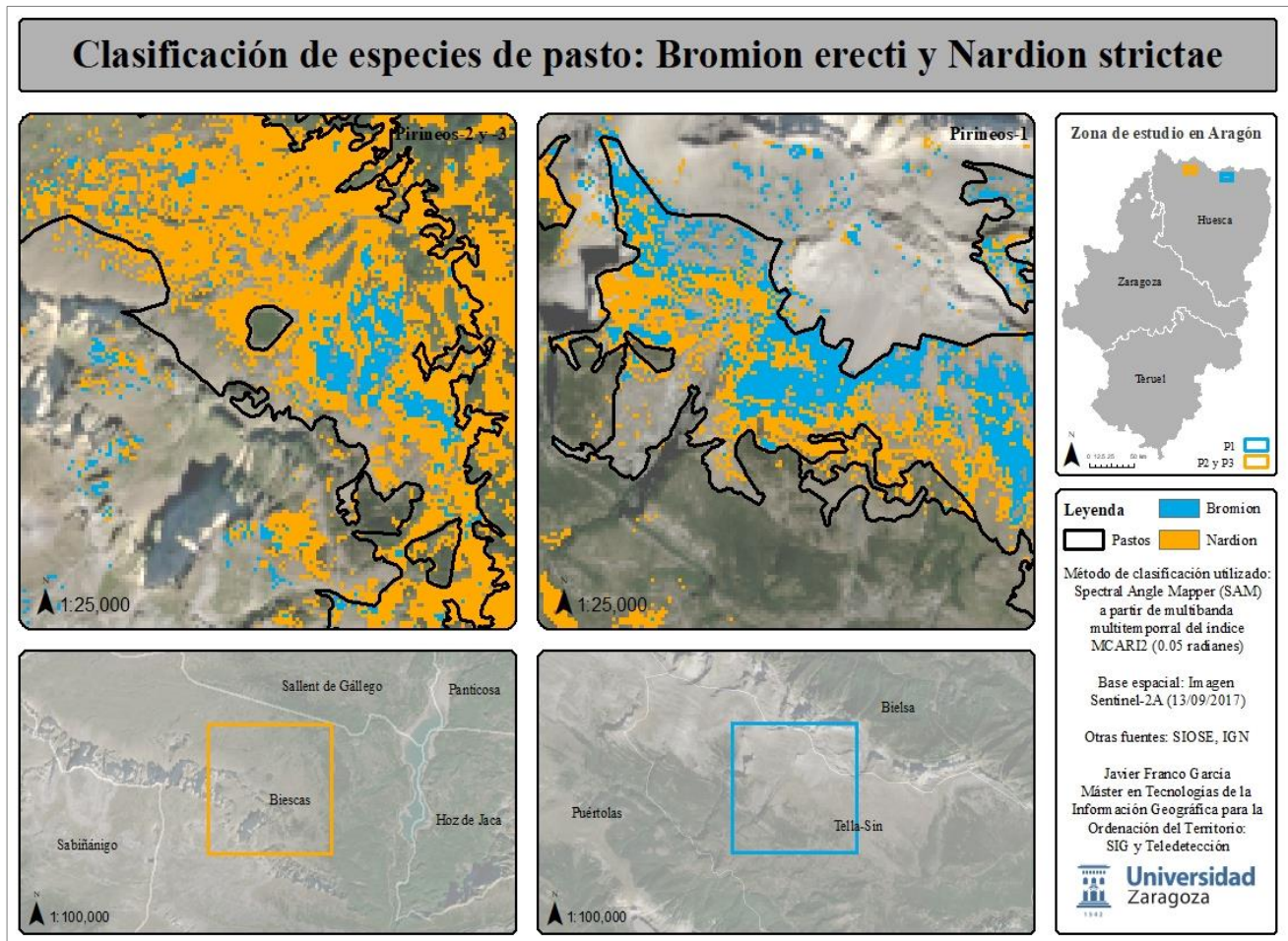
En segundo lugar, podría considerarse la utilización de otros métodos de clasificación que aporten resultados diferentes. La tendencia actual en la bibliografía relacionada se dirige hacia la utilización de otro tipo de algoritmos de clasificación. Es decir, SAM es un método confiable y ampliamente utilizado y contrastado (South *et al.*, 2004; Girouard *et al.*, 2004), pero la línea que los estudios están explorando en la actualidad con más asiduidad es la de los métodos relacionados con el *Machine Learning*, entre los que destacan *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), *Super Learner Methodology* (SL) o *Artificial Neural Network* (ANN).

Hasta hace un tiempo, estos algoritmos del *Machine Learning* no habían sido masivamente utilizados para clasificaciones de variables relacionadas con la vegetación (cultivos, bosques, pastos...) en estudios de teledetección ambiental, por lo que los resultados obtenidos en cada estudio no habían tenido la oportunidad de ser comparados y contrastados en profundidad por otros proyectos (Nitze *et al.*, 2012). No obstante, ya es posible encontrar una interesante selección de artículos científicos que utilizan estos métodos para clasificar datos Landsat, MODIS o Sentinel. Particularmente, algunos autores como Belgiu y Dragut (2016) determinan que RF es un valor seguro en cuanto a clasificación de datos multi e hiperespectrales; mientras que otros estudios como el de Sonobe *et al.* (2018), demuestran que SVM obtiene mejores resultados en la clasificación de cultivos a partir de datos Sentinel-2 que RF. Asimismo, las primeras experiencias de clasificación que se realizaron a partir de datos Sentinel-2 mediante RF demostraron que este era un buen método, aunque obtenía resultados muy similares a las clasificaciones supervisadas clásicas (Immitzer *et al.*, 2016).

Las principales contrapartidas de estos algoritmos de clasificación de *Machine Learning* se centran en su alto requerimiento de tiempo y de estudio de los parámetros que los caracterizan. En el caso de RF y SVM son necesarias muestras de datos lo suficientemente grandes como para poder subdividir el conjunto de estas en secciones de training y test estadísticamente independientes que permitan una buena validación (Belgiu y Dagut, 2016; Sonobe, 2018), requisito que la muestra de datos con la que se ha trabajado en este estudio en concreto no cumple. De hecho, SVM se ha desmarcado como un excelente método de clasificación con alta sensibilidad a considerar valores atípicos cuando el número de *inputs* es alto (Camps-Valls *et al.*, 2009; Sonobe *et al.*, 2018).

#### 4.4. Cartografía resultante de la clasificación

A continuación, se presenta el resultado final de todo el procedimiento de clasificación descrito anteriormente: la cartografía de las dos especies de pasto -*Bromion erecti* y *Nardion strictae*- consideradas en el estudio (Figura 19).



**Figura 19.** Cartografía de clasificación de especies de pasto mediante SAM a partir de MCARI2.

Tal y como se especifica en el propio mapa, el método de clasificación por el que se ha optado para la elaboración de la cartografía ha sido la serie temporal del índice de vegetación MCARI2. Esta decisión se sustenta en los datos obtenidos previamente en los procesos de validación de las distintas clasificaciones. Pese a que la imagen multiespectral del 13 de septiembre muestra, generalmente, un mejor grado de acuerdo con la verdad-terreno, el índice MCARI2 clasifica con mayor precisión, ya que sus valores *rule* son muy bajos para ambas comunidades de pasto. Es decir, MCARI2 como agente de la clasificación, ha clasificado, seguramente, menos píxeles que la imagen multiespectral, si bien aquellos que ha clasificado lo ha hecho con la máxima certeza de que pertenecen a la categoría establecida. Por tanto, existirán algunos errores de omisión, pero muy pocos de comisión.

Más allá de los datos, la propia interpretación visual de la cartografía ofrece señales acerca de la bondad de la clasificación. Gracias a los datos iniciales proporcionados desde el proyecto PROPAST, conocemos que la gran mayoría de la superficie cercana a P-1 está cubierta por formaciones de *Bromion erecti* mientras que en P-2 y P-3 predomina el *Nardion strictae*. Observando el mapa, se puede concluir que estas tendencias se corroboran con esta clasificación.

Además, se aprecia que, en P-1, el método seleccionado ha dejado acertadamente sin clasificar la mitad sur de la zona, correspondiente a formaciones vegetales de mayor porte, tal y como se puede apreciar en la imagen Sentinel-2, que actúa de base cartográfica.

## 5. CONCLUSIONES

La consideración de un enfoque multitemporal a la hora de estudiar comunidades vegetales de pastos enriquece el propio análisis multiplicando las operaciones posibles a realizar. En este caso concreto, gracias a este enfoque se han detectado las principales tendencias del ciclo fenológico de dos especies muy similares, llegando a establecer variaciones entre su respuesta espectral a lo largo de la serie temporal analizada.

En este sentido, se ha comprobado que las comunidades de *Bromion erecti* y *Nardion strictae*, que presentan una forma y reparto muy similar en el ambiente del Pirineo Aragonés, comparten comportamiento espectral en todas las regiones del espectro electromagnético en la mayor parte de su ciclo fenológico. Precisamente este trabajo demuestra que existen algunas pequeñas diferencias significativas en el momento en el que se produce el agostamiento de ambas especies: el *Bromion* presenta una caída en sus valores de reflectividad en la región del NIR y del RE con la llegada del otoño, no observable, o con mucha menor intensidad, en las comunidades de *Nardion*.

La consideración de estas diferencias como un factor activo en el análisis y posterior clasificación supervisada de la zona deriva de la aproximación multitemporal con la que se concibe el estudio. Es decir, gracias a ella se han podido determinar las mejores fechas para realizar una clasificación supervisada a partir de una imagen multiespectral, así como la serie temporal de imágenes más idónea para calcular índices de vegetación sobre los que edificar el proceso de clasificación. El periodo en el que se discrimina mejor entre las dos comunidades de estudio es el final del verano y el principio del otoño, cuando las comunidades de *Bromion erecti* han comenzado su agostamiento y las de *Nardion strictae* no lo han hecho todavía. En relación a esto último, se destaca la fecha del trece de septiembre de 2017 como la que mejores resultados estadísticos ofrece en cuanto a diferencias espectrales entre ambas comunidades se refiere. Además, MCARI2 sobresale como el índice de vegetación que mejor caracteriza estas variaciones a lo largo de la serie temporal por lo que se ha seleccionado la clasificación supervisada ejecutada a partir de este índice como cartografía final. Esta clasificación presenta un acierto del 61% en los puntos conocidos, con un ángulo máximo muy estricto (0.05 radianes). Es decir, los píxeles clasificados mediante este método, aunque sean menos en número, tienen una alta certeza de pertenecer a la cubierta de referencia, pues los ángulos medios de clasificación o valores *rule* son inferiores a 0.04 radianes en este caso. Estos valores que muestra MCARI2 en la clasificación son mucho mejores que los mostrados por la imagen multiespectral del trece de septiembre de 2017 (superiores a 0.08).

Los resultados de las clasificaciones efectuadas deben siempre ir acompañados de la reflexión acerca del objeto que estamos categorizando. En este caso, al tratarse de dos formaciones vegetales extremadamente parecidas, es natural, dentro de lo que cabe, que los resultados de acierto y grado de acuerdo puedan no alcanzar valores de precisión muy elevados, incluso a pesar de haber detectado -análisis multitemporal mediante- las mejores, bandas, índices o fechas para desarrollar la clasificación. De hecho, considerando la dificultad que implica la discriminación de dos comunidades de pastos tan parecidos, estos resultados pueden considerarse muy positivos,

Asimismo, se han de tener en cuenta, a la hora de examinar los resultados de este trabajo, las limitaciones de los satélites Sentinel-2 como sensor multi-espectral. Pese a haber desempeñado una buena función gracias a la incorporación de las dos bandas del RE y las otras dos en el NIR, no puede llegar a caracterizar todos los rasgos espectrales que sí podrían caracterizar las imágenes hiperespectrales o los datos tomados con espectro-radiómetro de campo.

De la misma manera, la exploración de nuevos métodos de clasificación por parte de la bibliografía relacionada podrá conducir a mejores resultados de acuerdo en las clasificaciones y, por tanto, a caracterizaciones del medio más precisas.

En conclusión, este trabajo demuestra que es posible realizar una buena clasificación supervisada de dos especies vegetales muy parecidas a partir de datos multiespectrales Sentinel-2, considerando siempre la dimensión temporal de los mismos como motor de las decisiones a tomar en el proceso de elección de variables para realizar la clasificación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al proyecto PROPAST por proporcionar el marco contextual del proceso, así como información de campo sobre la que desarrollar el trabajo.

A la Dra. Maite Gartzia por aportar los puntos de validación externa y las fotografías de la zona, así como por compartir su amplio conocimiento en la materia.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alados, C. L.; Komac, B.; Bueno, G.; Gartzia, M.; Escós, J.; Gómez García, D.; García-González, R.; Fillat, F.; Camarero, J. J.; Herrero, J. y Pueyo, Y. (2010): “Modelización de la matorralización de los pastos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y su relación con el cambio global. *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2007-2010*, pp. 101-123.
- Alados, C. L.; Nuche, P.; Gartzia, M.; Sáiz, H.; Escós, J.; Fillat, F.; Kéfi, S. y Pueyo, Y. (2014): “Dinámica de la interacción pasto-arbusto y su efecto en la conservación de las comunidades vegetales alpinas del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2011-2014*, pp. 77-105.
- Asner, G. P. y Heidebrecht, K. B. (2002): “Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon cover in arid regions: comparing multispectral and hyperspectral observations”. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 19, pp 3939-3958.
- Badía Villas, D.; García-González, R. y Martí Dalmau, C. (2002): “Clasificación de suelos en pastos alpinos de Aísa y Ordesa (Pirineo Central). *EDAFOLOGÍA*, Vol 9 (1), pp. 11-22.
- Belgiu, M. y Dragut, L. (2016): “Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, pp. 24-31.
- Camps-Valls, G.; Muñoz-Marí, J.; Gómez-Chova, L.; Richter, K. y Calpe-Maravilla, J. (2009): “Biophysical parameter estimation with a semisupervised support vector machine”. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* Vol.6, pp. 248-252.
- Clevers, J. G. P. W. y Gitelson, A. A. (2013): “Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23, pp. 344-351.
- Dale, L. M.; Thewis, A.; Boudry, C.; Rotar, I.; Pacurar, F. S.; Abbas, O.; Dardenne, P.; Baeten, V.; Pfister, J. y Fernández Pierna, J. A. (2013): “Discrimination of grassland species and their classification in botanical families by laboratory scale NIR hyperspectral imaging: Preliminary results”. *Talanta*, 116, pp. 149-154.
- De Carvalho, O. A. y Meneses, P. R. (2000) "Spectral correlation mapper (SCM): an improvement on the spectral angle mapper (SAM)." *Summaries of the 9th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 00-18. Vol. 9. JPL Publication Pasadena, CA.*
- Diao, C. y Wang, L. (2018): “Landsat time series-based multiyear spectral angle clustering (MSAC) model to monitor the inter-annual leaf senescence of exotic satlcedar”. *Remote Sensing of Environment*, 209, pp. 581-593.
- Frampton, W.J.; Dash, J.; Watmough, G. y Milton, E.J. (2013): “Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, pp. 83-92.
- García-González, R.; Alados, I. C. L.; Bueno, G.; Fillat, F.; Gartzia, M.; Gómez García, D.; Komac, B.; Marinas, A. y Saint-Jean, N. (2006): “Valoración ecológica y productiva de los pastos supraforestales en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Proyectos de investigación en parques nacionales: 2003-2006*.
- García-González, R.; Aldezabal, A.; Garin, I. y Marinas, A. (2005): “Valor nutritivo de las principales comunidades de pastos en los puertos de Góriz (Pirineo Central)”. *Pastos 2005*, pp. 77-103.
- García-González, R.; Gómez-García, R. y Aldezabal, A. (1998): “Resultados de 6 años de exclusión del pastoreo sobre la estructura de comunidades del *Bromion erecti* y el *Nardion Strictae* en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido”. *Actas de la 38ª Reunión Científica de la Sociedad Española para el estudio de los pastos*, pp. 55-59.
- Gartzia, M. (2016): “Evaluación de cambios en los pastos del Pirineo Central y su relación con los componentes agropastorales”.
- Gartzia, M.; Pérez-Cabello, F.; Bueno, G. y Alados, C. L. (2015): “Physiognomic and physiologic changes in mountain grasslands in response to environmental and anthropogenic factors”. *Applied Geography*, 66, pp. 1-11.

- Girouard, G.; Bannari, A.; El Harti, A. y Desrochers, A. (2004): "Validate Spectral Angle Mapper algorithm for geological mapping: comparative study between Quickbird and Landsat-TM". *XXth ISPRS congress, geo-imagery bridging continents, Istanbul, Turkey*, pp. 12-23.
- Gómez-García, D. y García-González, R. (2011): "Evolución de la estructura florística tras 18 años de exclusión del pastoreo en pastos subalpinos del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca)".
- Gómez-García, D. (2008): "Pastos del Pirineo: breve descripción ecológica y florística.
- Guerschmann, J. P.; Hill, M. J.; Renzullo, L. J.; Barret, D. J.; Marks, A. S. y Botha, E. J. (2009): "Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors". *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 928-945.
- Haboudane, D.; Miller, J. R.; Pattey, E.; Zarco-Tejada, P. J. y Strachan, I. B. (2004): "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting Green LAI of crop canopies: Modelling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, pp. 337-352.
- Hill, M. J. (2013): "Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel-2 data for a North American transect". *Remote Sensing of Environment*, 137, pp. 94-111.
- Immitzer, M.; Vuolo, F. y Atzberger, C. (2016): "First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe". *Remote Sensing 2016*, 8.
- Lopatin, J.; Fassnacht, F. E.; Kattenborn, T. y Schmidtlein, S. (2017): "Mapping plant species in mixed grassland communities using close range imaging spectroscopy". *Remote Sensing of Environment*, 201, pp. 12-23.
- Main, R.; Cho, M. A.; Mathieu, R.; O'Kennedy, M. M.; Ramoelo, A. y Koch, S. (2011): "An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, pp. 751-761.
- Marsett, R. C.; Qi, J.; Heilman, P.; Biedenbender, S. H.; Watson, C. M.; Amer, S.; Weltz, M.; Goodrich, D. y Marsett, R. (2006): "Remote sensing for grassland management in the Arid Southwest". *Rangeland Ecol Manage*, 59, pp. 530-540.
- Nguy-Robertson, A.L. (2013): "The mathematical identity of tow vegetations indices: MCARI2 and MTVI2". *International Journal of Remote Sensing*, 34:21, pp. 7504-7507.
- Nitze, I.; Schulthess, U. y Asche, H. (2012): "Comparison of machine learning algorithms random forest, artificial neural network and support vector machine to maximum likelihood for supervised crop type classification." *Proceedings of the 4th GEOBIA, May 7-9, 2012*, pp 35-40.
- Shoko, C. y Mutanga, O. (2017): "Examining the strength of the newly-launched Sentinel-2 MSI sensor in detecting and discriminating subtle differences between C3 and C4 grass species". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129, pp. 32-40.
- Sonobe, R.; Yamaka, Y.; Tani, H.; Wang, X.; Kobayashi, N. y Mochizuki, K. (2018): "Crop classification from Sentinel-2 derived vegetation indices using ensemble learning. *Journal of Applied Remote Sensing* 12(2).
- South, S.; Qi, J. y Lusch, D. P. (2004): "Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices". *Remote Sensing of Environment*, 91, pp. 90-97.
- Vuolo, F.; Neuwirth, M.; Immitzer, M.; Atzberger, C. y Wai-Tim, N. (2018): "How much does multi-temporal Sentinel-2 data improve crop type classification?". *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 72, pp. 122-130.
- Yang, L.; Wylie, B. K.; Tiezsen, L. L y Reed, B. C. (1998): "An analysis of relationships among Climate Forcing and Time-Integrates NDVI of grasslands over the US Northern and Central Great Plains". *Remote Sensing of Environment*, 65, pp. 25-37.

## ANEXOS

## Resultado del análisis de la normalidad de los datos en SPSS

Valor de “Sig” para cada banda y cada fecha.

Fecha	26/05/2017	05/07/2018	14/08/2017	24/08/2017	08/09/2017	13/09/2018
B02	0,200	0,000	0,006	0,074	0,004	0,200
B03	0,200	0,011	0,000	0,200	0,000	0,200
B04	0,069	0,000	0,000	0,066	0,029	0,008
B05	0,200	0,200	0,002	0,200	0,003	0,200
B06	0,200	0,200	0,161	0,006	0,062	0,067
B07	0,200	0,200	0,200	0,179	0,008	0,200
B8A	0,200	0,200	0,200	0,074	0,035	0,200
B11	0,000	0,014	0,024	0,200	0,200	0,000
B12	0,000	0,200	0,003	0,012	0,000	0,000
Fecha	28/09/2017	03/10/2017	08/10/2017	13/10/2017	28/10/2017	12/11/2017
B02	0,072	0,200	0,182	0,200	0,010	0,070
B03	0,008	0,200	0,021	0,200	0,013	0,023
B04	0,029	0,200	0,004	0,200	0,001	0,200
B05	0,001	0,200	0,000	0,200	0,002	0,002
B06	0,098	0,095	0,195	0,161	0,200	0,001
B07	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,013
B8A	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,000
B11	0,038	0,072	0,006	0,018	0,007	0,650
B12	0,057	0,000	0,023	0,182	0,010	0,200

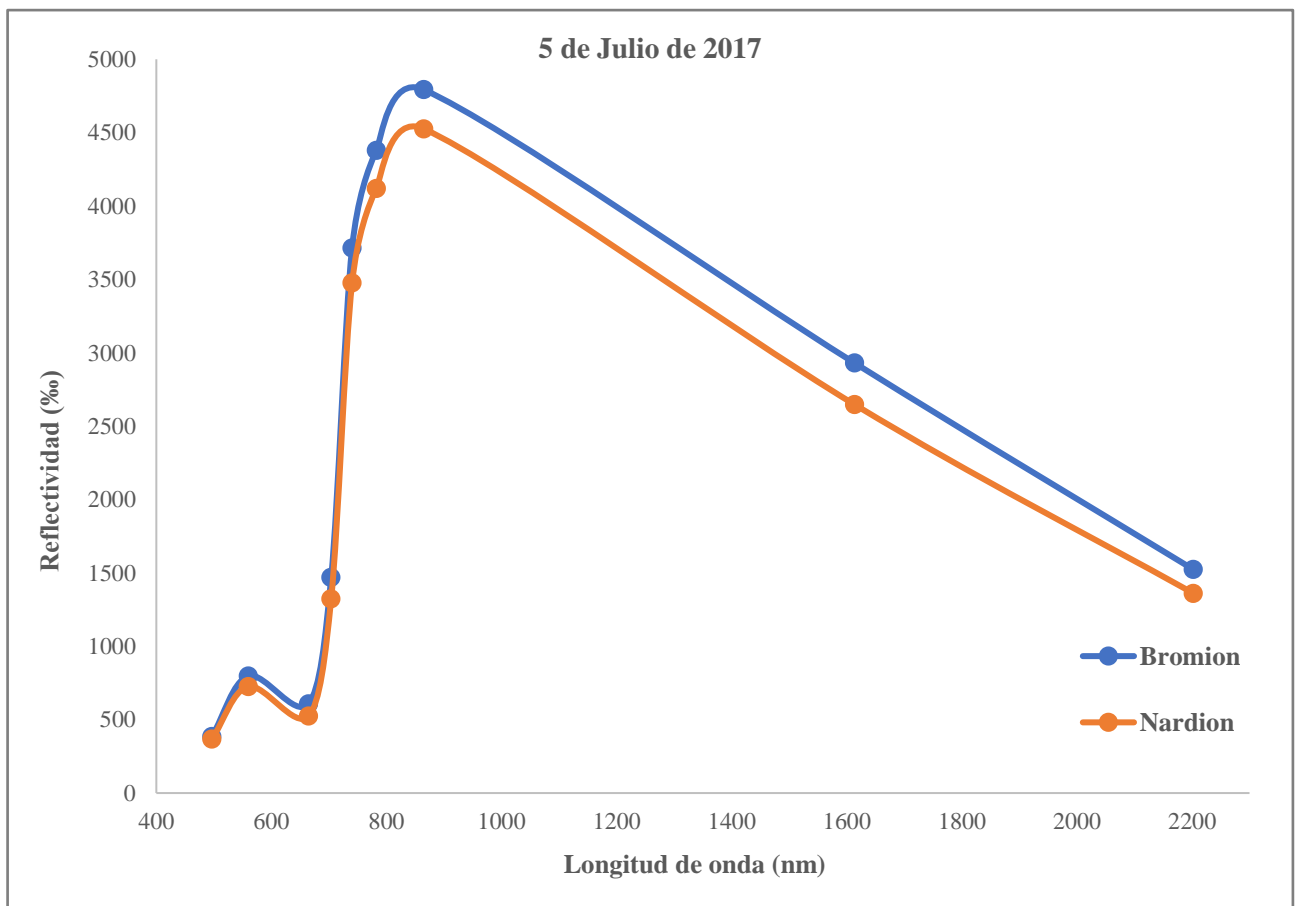
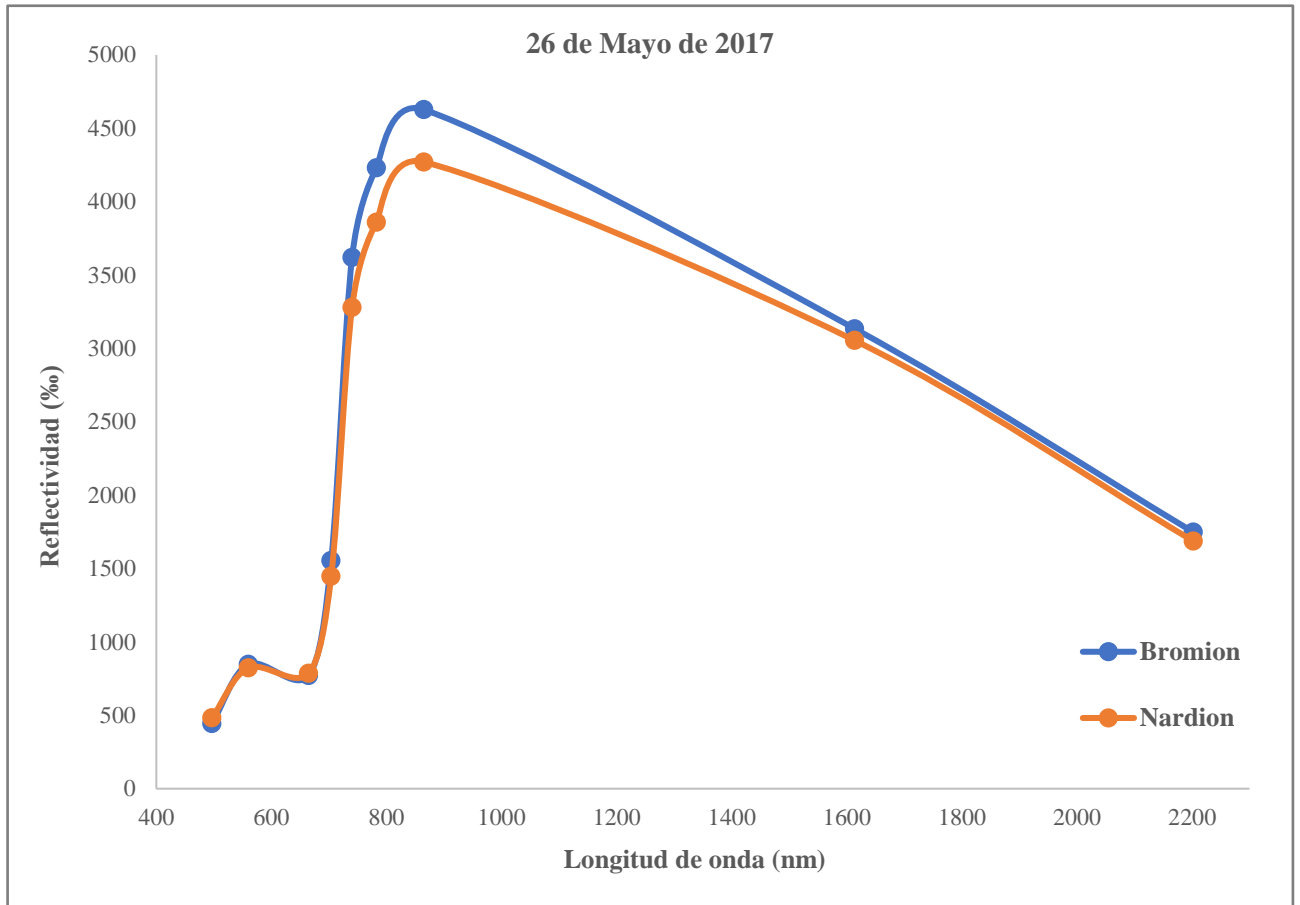
Valor de “Sig” para cada índice y cada fecha.

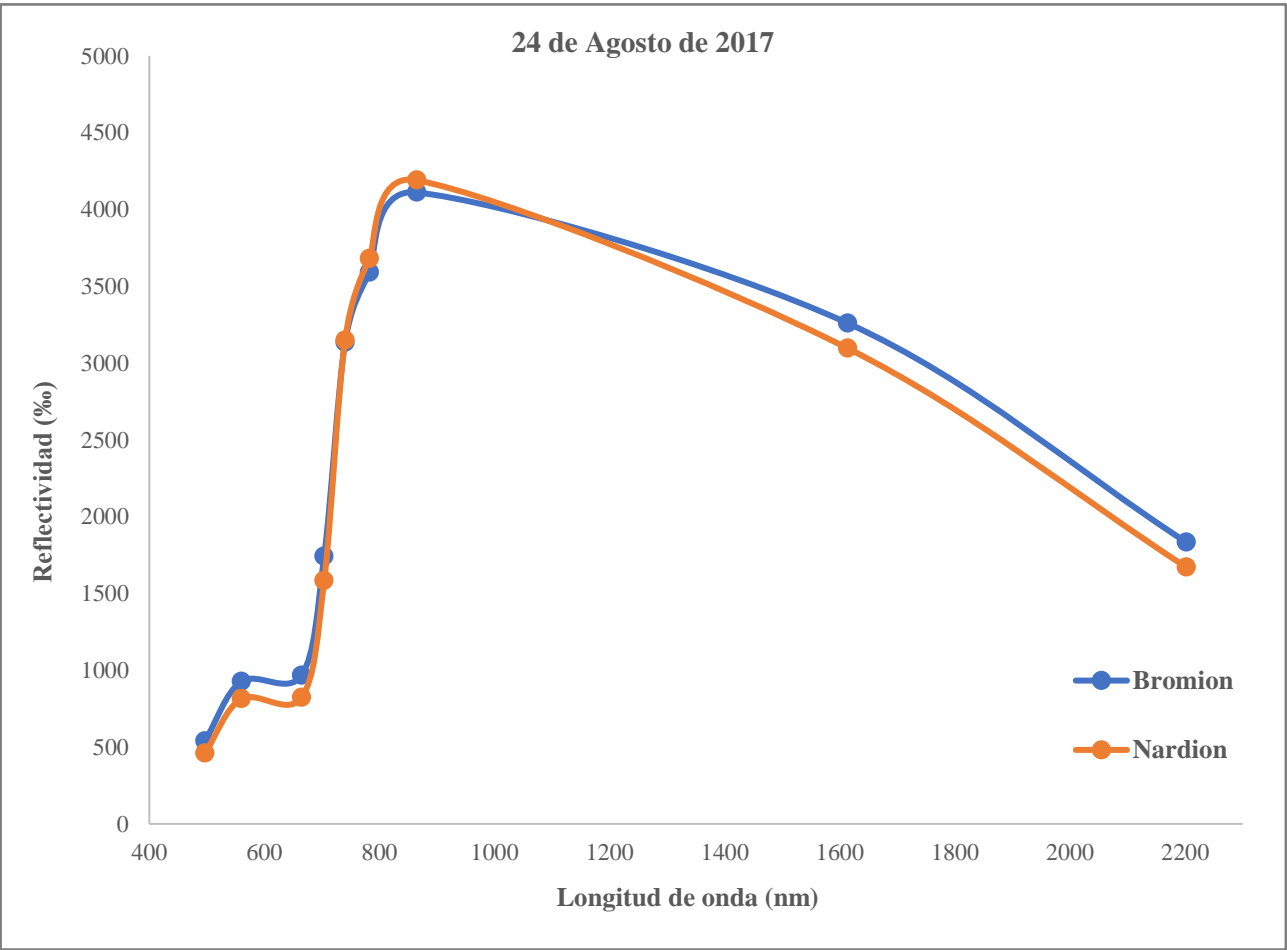
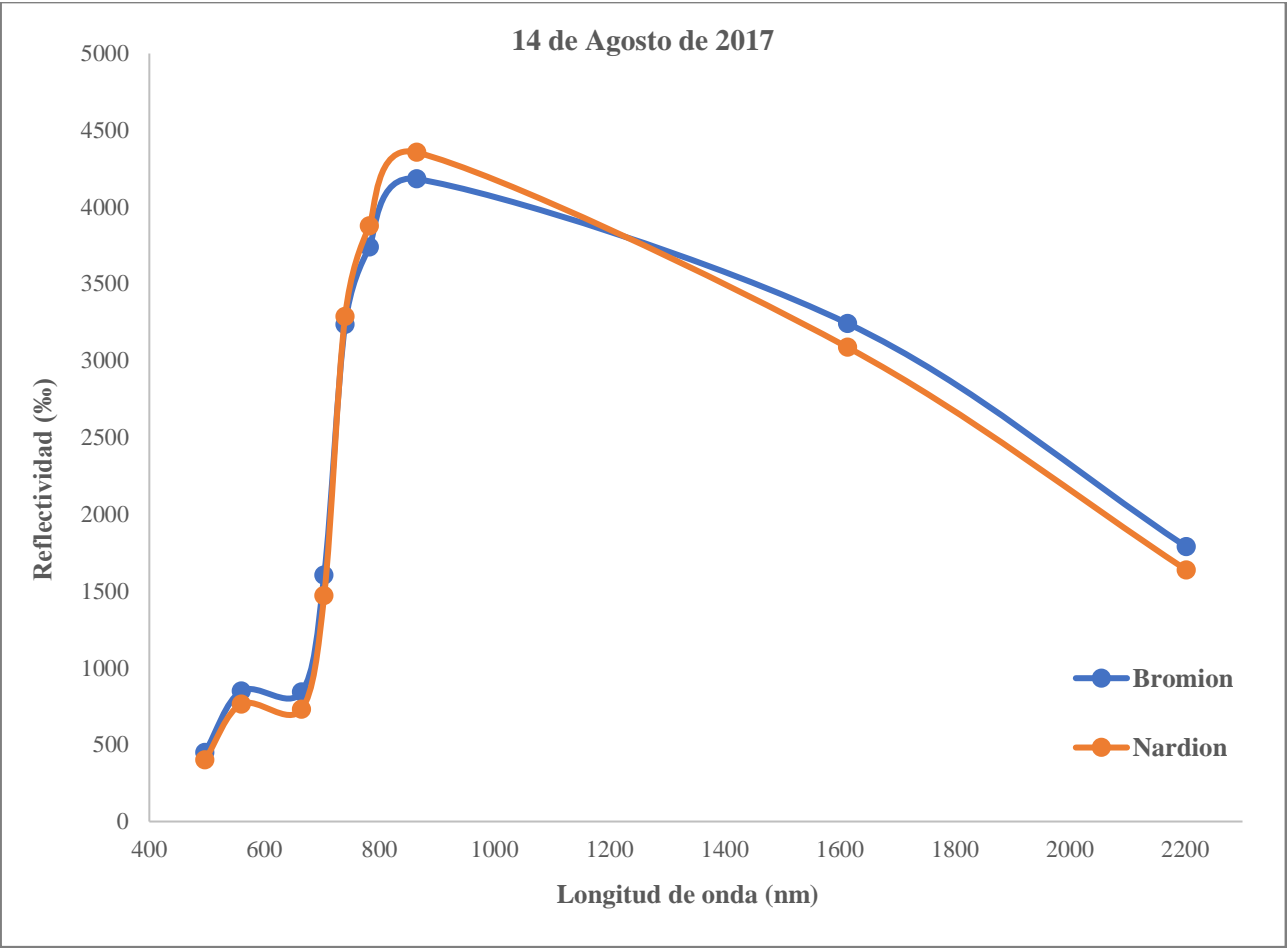
Fecha	26/05/2017	05/07/2018	14/08/2017	24/08/2017	08/09/2017	13/09/2018
NDVI	0,036	0,000	0,005	0,006	0,000	0,000
NBR	0,044	0,002	0,069	0,151	0,001	0,001
MCARI2	0,024	0,000	0,025	0,015	0,000	0,000
MTVI2	0,011	0,000	0,006	0,002	0,000	0,000
MTCI	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000
S2REP	0,056	0,200	0,000	0,000	0,079	0,200
IRECI	0,200	0,005	0,165	0,001	0,197	0,179
Fecha	28/09/2017	03/10/2017	08/10/2017	13/10/2017	28/10/2017	12/11/2017
NDVI	0,083	0,035	0,200	0,200	0,200	0,200
NBR	0,000	0,000	0,004	0,003	0,000	0,098

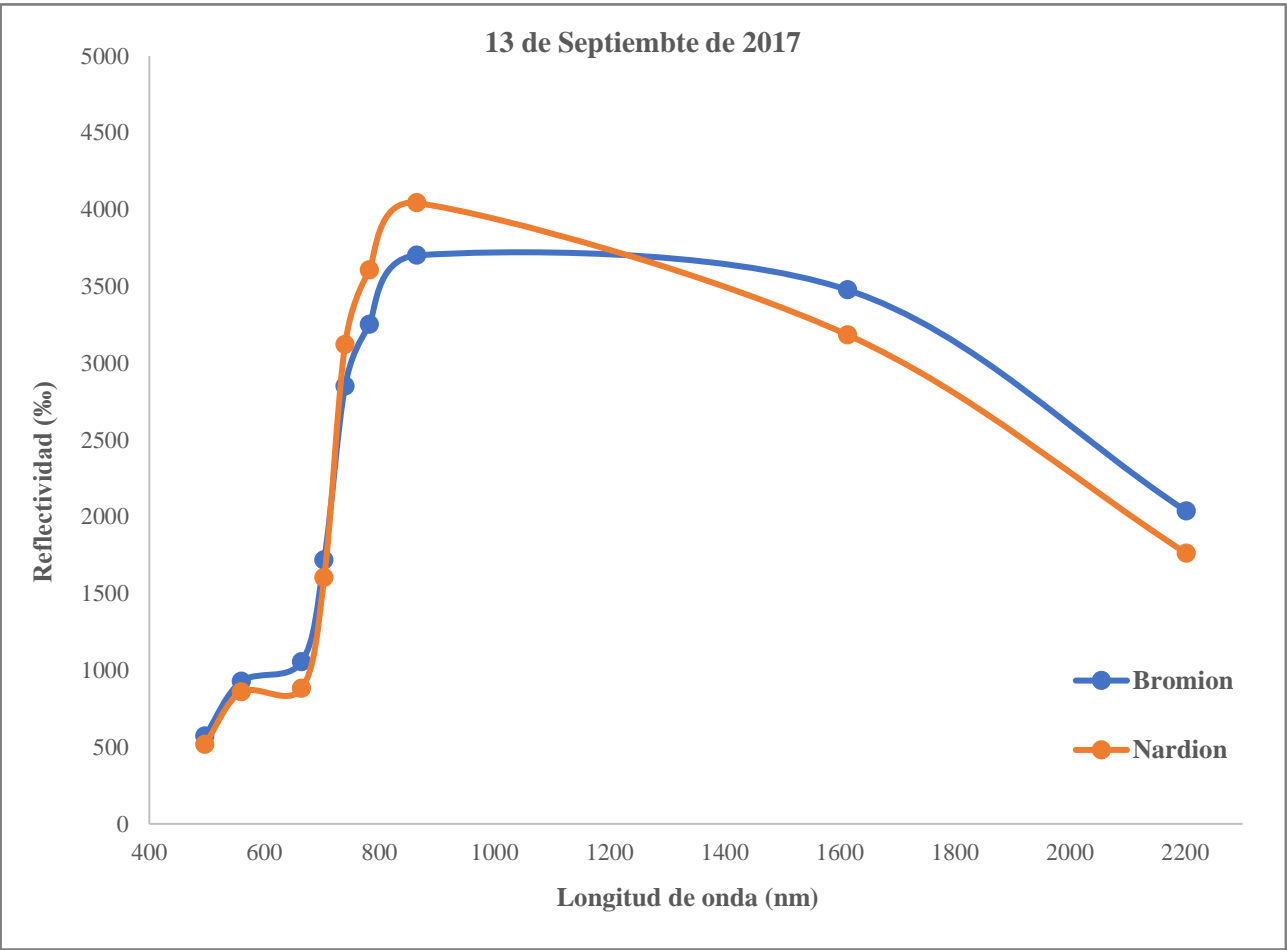
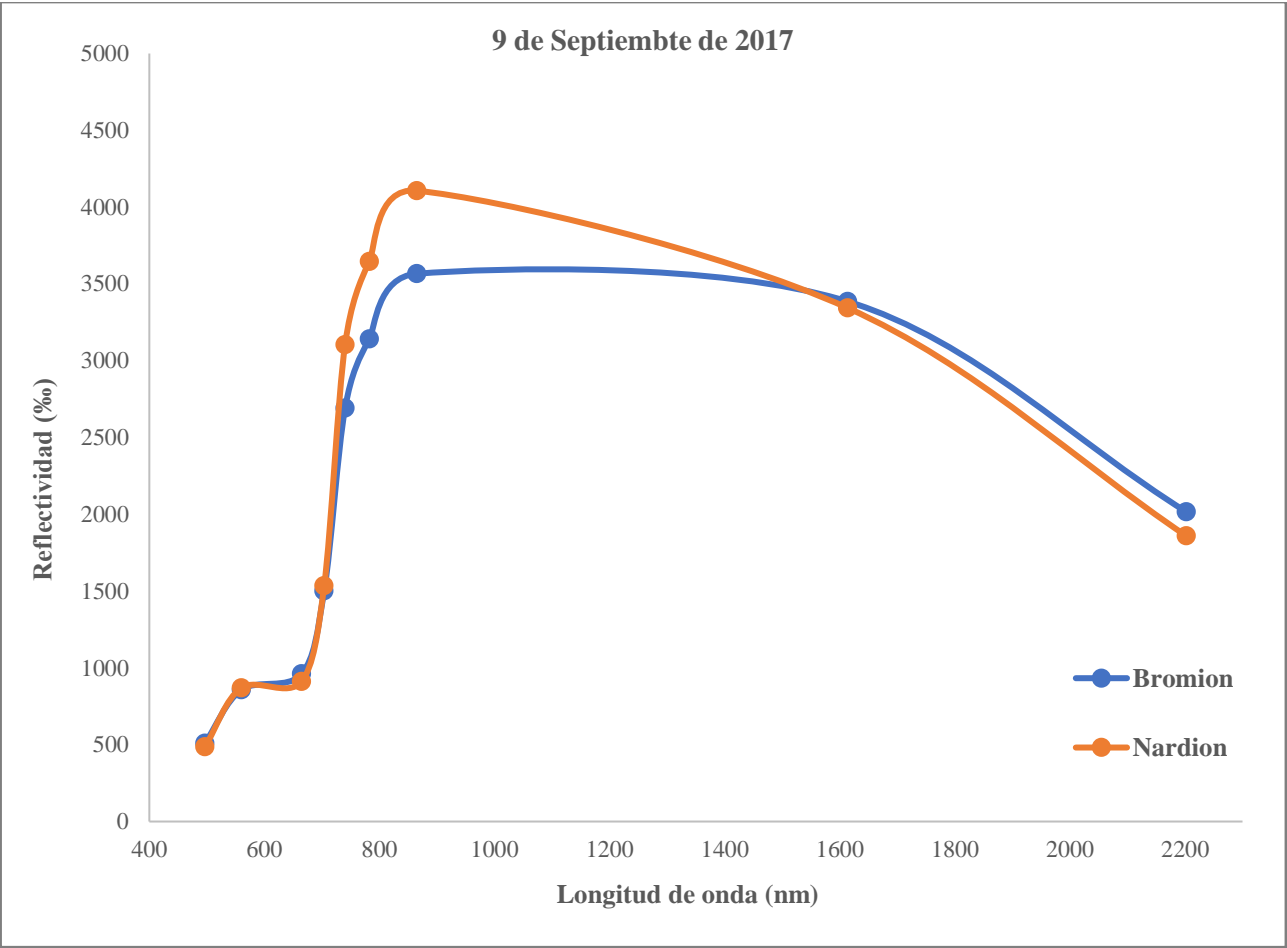
<b>MCARI2</b>	0,005	0,015	<b>0,070</b>	0,045	<b>0,198</b>	<b>0,200</b>
<b>MTVI2</b>	0,021	0,007	<b>0,058</b>	0,038	<b>0,161</b>	<b>0,200</b>
<b>MTCI</b>	0,002	0,200	0,025	0,038	<b>0,200</b>	0,003
<b>S2REP</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	0,006	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	0,001
<b>IRECI</b>	0,014	0,000	0,035	0,001	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>

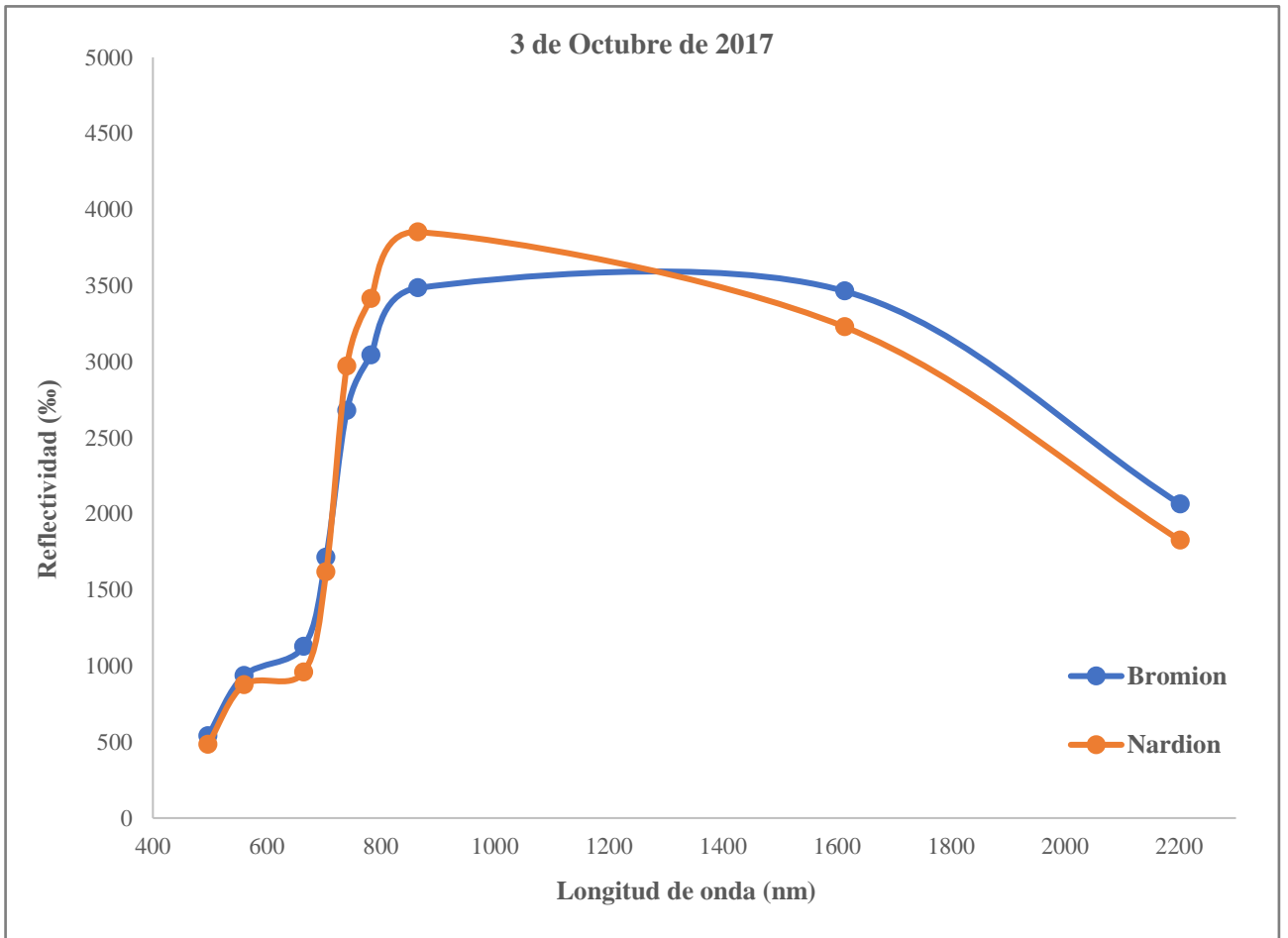
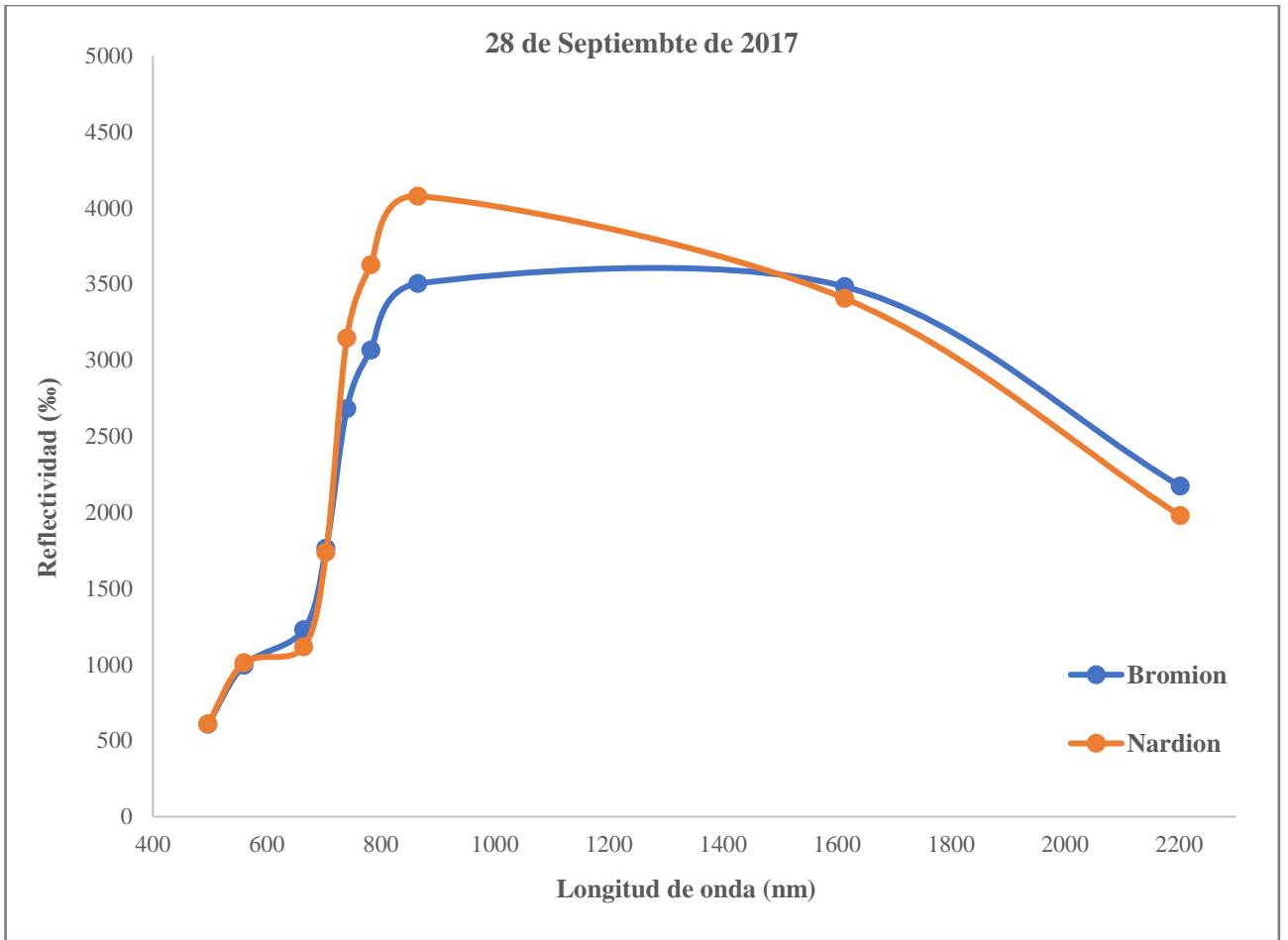
Sombreados en color azul claro aparecen aquellas series de datos que se considera tienen una distribución normal de los mismos tras la aplicación del test de normalidad. Este test devuelve distintos valores al ejecutarlo en el entorno de IBM SPSS Statistics, entre los cuales es necesario discernir para conocer si la distribución de los datos es normal o no. En este caso, se acude al valor “Sig.” del test de Kolmogrov-Smirnov, puesto que el conjunto de datos de cada banda para cada fecha es de 62 valores. La tabla anterior recoge, pues, estos valores, indicando en qué series se podrían aplicar análisis que requieran de normalidad en los datos.

**Serie temporal completa de gráficas de firmas espectrales de *Bromion erecti* y *Nardion strictae* para el año 2017.**

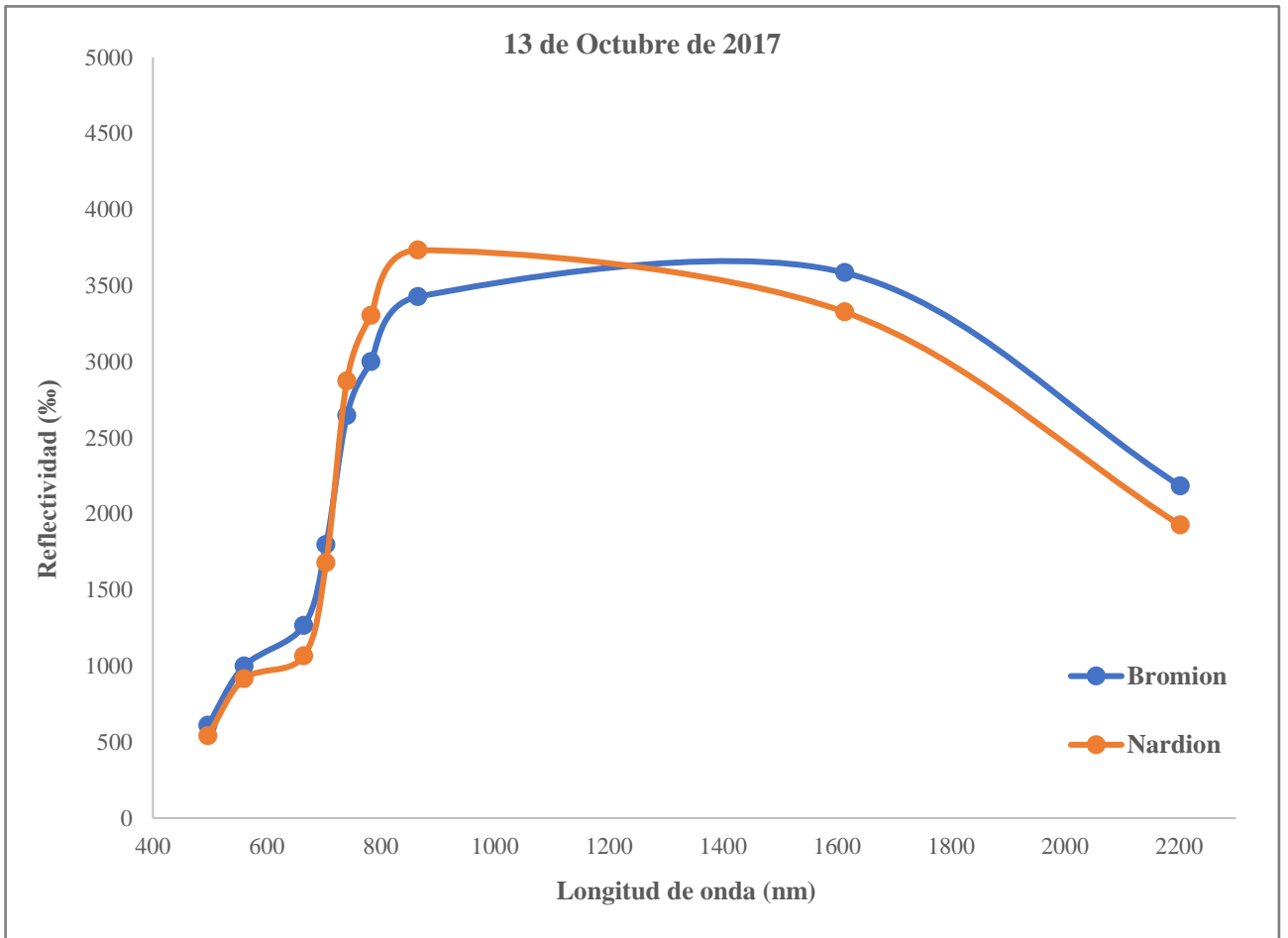
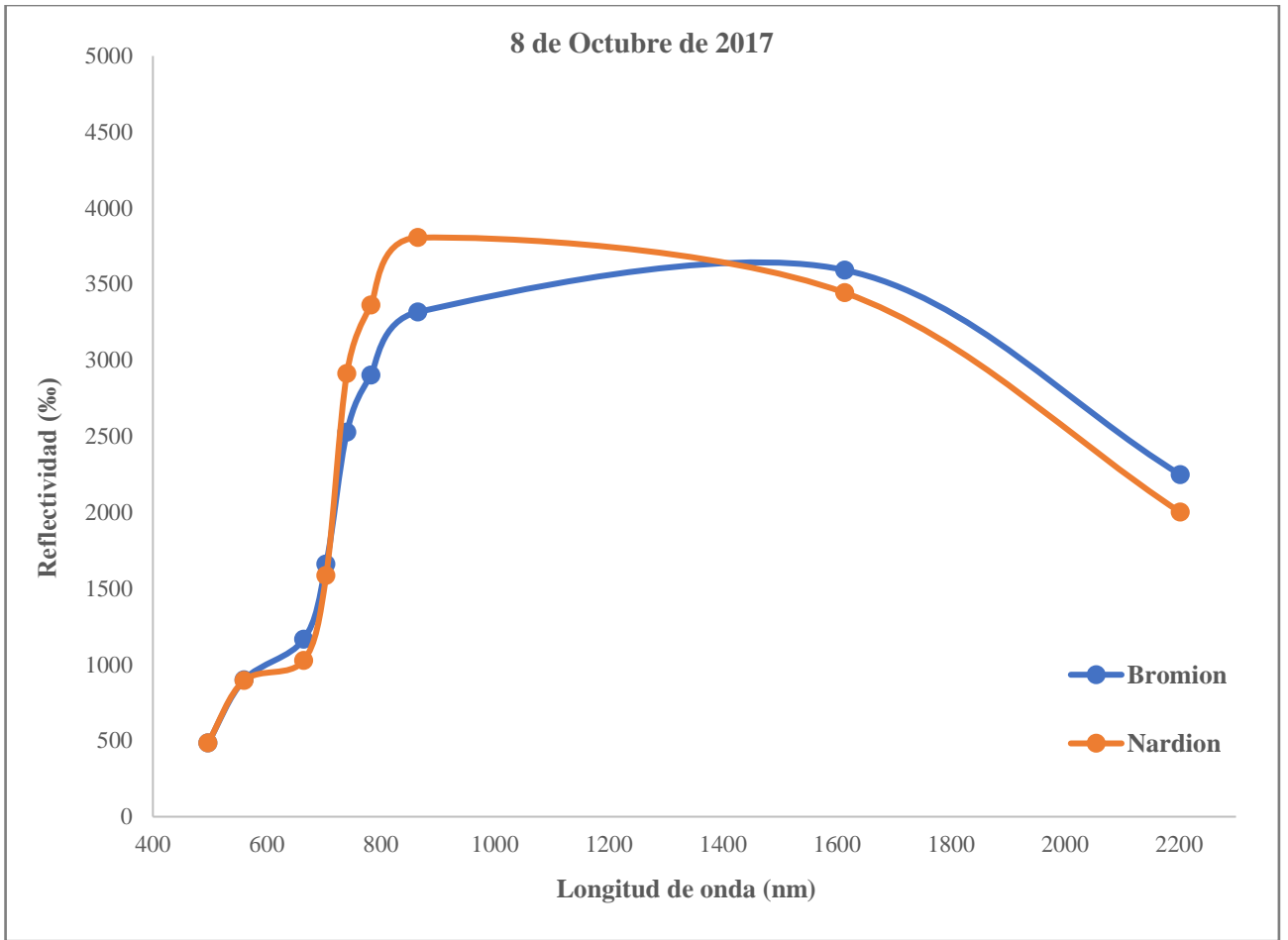


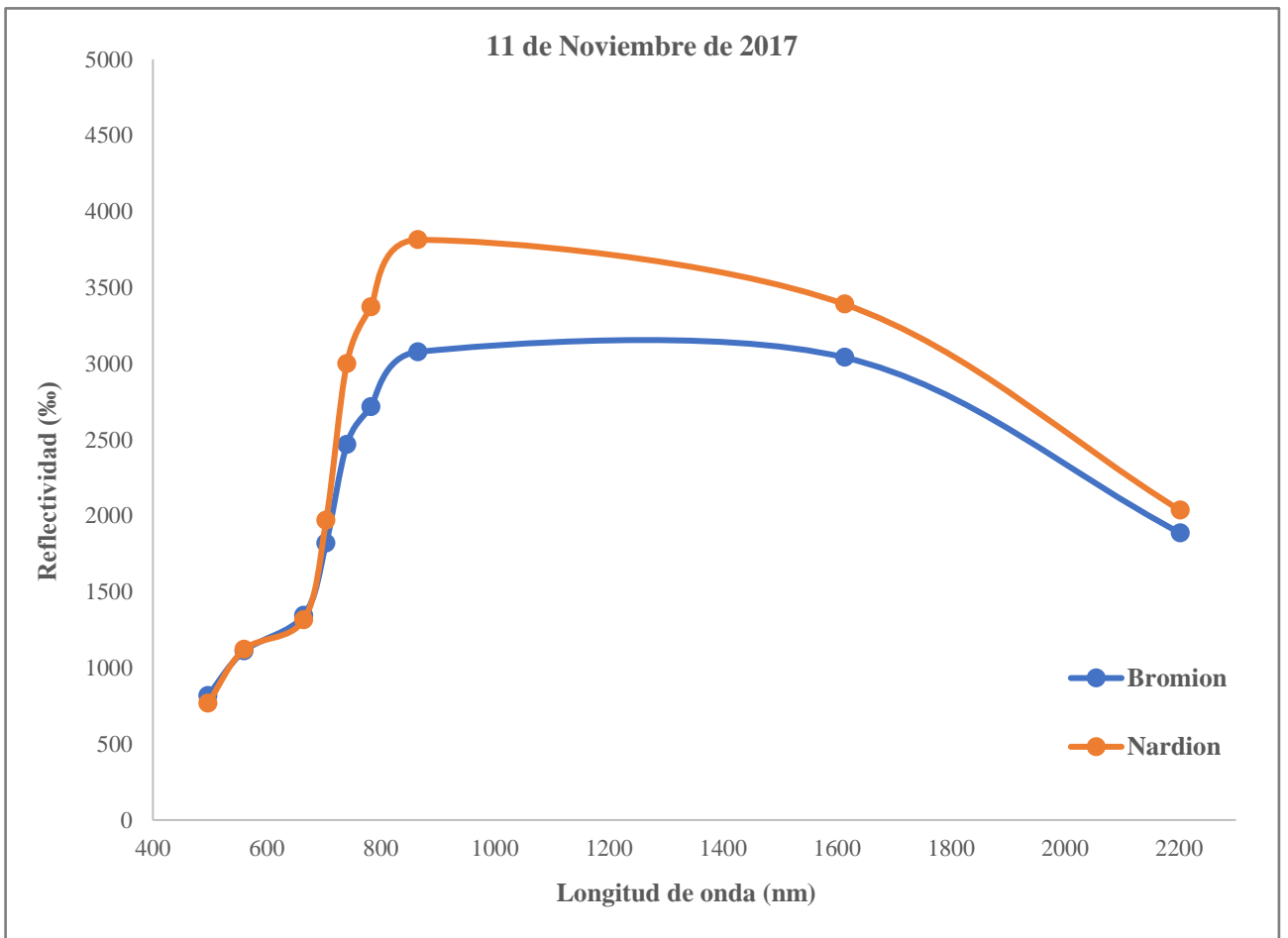
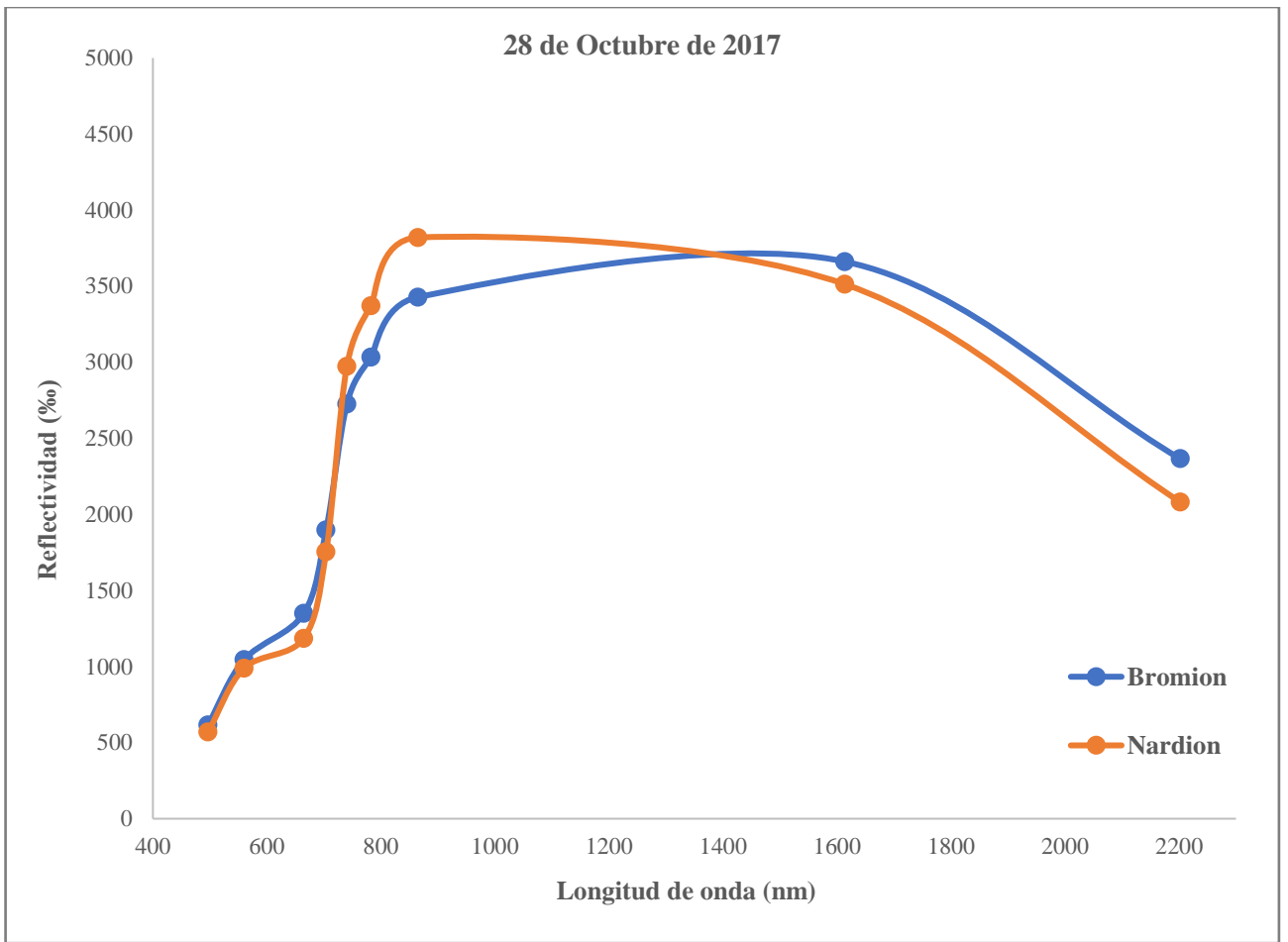












## **Cartografías.**

A continuación, se presentan las cartografías elaboradas en el marco del presente trabajo.