



**Universitat de les
Illes Balears**

Facultat de Filosofia i Lletres

Memòria del Treball de Fi de Grau

Monitorización de la regeneración vegetal post-incendio a partir de imágenes Landsat OLI 8: el caso del incendio de Andratx de 2013

Josep Lluís Bernad Ginard

Grau de Geografia

Any acadèmic 2015-2016

DNI de l'alumne: 41524425H

Treball tutelat per Dr. Jorge Lorenzo Lacruz
Departament de Geografia

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació

Autor		Tutor
Sí	No	Sí
x		x

Paraules clau del treball:

SIG, Teledetecció, Landsat OLI 8, Normalized Burn Ratio, Normalized Differenced Vegetation Index.

Índice

1. Lista de figuras	pg. 1
2. Lista de tablas	pg. 1
3. Lista de acrónimos	pg. 1
4. Resumen	pg. 1
5. Introducción	pg. 2
5.1 Antecedentes	pg. 2
5.2 Área de estudio	pg. 2
6. Justificación	pg. 6
7. Metodología	pg. 6
7.1 Tratamiento previo de las imágenes de satélite	pg. 6
7.2 Delimitación del área quemada	pg. 7
7.3 Cálculo y Evolución del NDVI	pg. 8
8. Resultados y discusión	pg. 10
8.1 Evolución del NDVI por tipo de vegetación	pg. 10
8.2 Evolución del NDVI por elevaciones	pg. 15
8.3 Evolución del NDVI por pendientes	pg. 20
8.4 Evolución del NDVI por orientaciones	pg. 24
8.5 Evolución del NDVI por recurrencia	pg. 30
9. Conclusiones	pg. 31
10. Agradecimientos	pg. 31
11. Referencias bibliográficas	pg. 32

1.- Lista de figuras

- Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.
- Figura 2. Valores climáticos mensuales de Andratx en el periodo de estudio.
- Figura 3. Mapas de factores en el área de estudio.
- Figura 4. Gráficos de superficie por factores.
- Figura 5. Mapas de evolución del NDVI por tipo de vegetación.
- Figura 6. Gráficos de evolución del NDVI por tipo de vegetación.
- Figura 7. Mapas de evolución del NDVI por elevaciones.
- Figura 8. Gráficos de evolución del NDVI por elevaciones.
- Figura 9. Mapas de evolución del NDVI por pendientes.
- Figura 10. Gráficos de evolución del NDVI por pendientes.
- Figura 11. Mapas de evolución del NDVI por orientaciones.
- Figura 12. Gráficos de evolución del NDVI por orientaciones.
- Figura 13. Gráficos de evolución del NDVI por recurrencia.

2.- Lista de tablas

Tabla 1. Imágenes Landsat 8 utilizadas.

3.- Lista de acrónimos

IBANAT: *Institut Balear de la Natura*
IFN3: Tercer Inventario Forestal Nacional
IVPGDIF: 4º Plan General de Defensa contra Incendios Forestales de las Islas Baleares
MFE: Mapa Forestal de España
ND: Niveles Digitales
NDVI: *Normalized Differenced Vegetation Index*
NBR: *Normalized Burn Ratio*
LIC: Lugar de Interés Comunitario
OLI: *Operational Land Imager*
SIG: Sistemas de Información Geográfica
ZAR: Zonas de Alto Riesgo

4.- Resumen

Este trabajo tiene como objetivo analizar la evolución de la vegetación después del incendio de Andratx de 2013. Para ello, se utilizó el Normalized Burn Ratio para delimitar el área afectada por el incendio. Posteriormente, se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8 y a través de ellas se ha calculado el NDVI en base a diferentes factores: vegetación, elevaciones, pendientes, orientaciones y recurrencia de incendios. Los resultados se muestran gráficamente para poder comparar los distintos factores y sus patrones de regeneración, con el fin de intentar extraer algunas conclusiones que puedan ayudar a entender cómo evoluciona la vegetación en función de sus características fisiográficas y de localización después de un incendio forestal.

5.- Introducción

Los incendios forestales son una importante amenaza para la biodiversidad que se encuentra en regiones mediterráneas. En las Islas Baleares, durante el año 2013, según los datos de IBANAT se quemaron unas 2.360 hectáreas de superficie forestal en un total de 56 incendios. La mayor parte de esas hectáreas corresponden al incendio de Andratx, que fue considerado el incendio forestal más importante de la historia de Baleares. Empezó el 26 de julio de 2013 en la zona de Sa Coma Calenta provocado por una negligencia y se dio por extinguido tres semanas más tarde. Este trabajo intenta analizar la regeneración vegetal post-incendio en base a varios factores (tipo de vegetación, elevaciones, pendientes, orientaciones y recurrencia de incendios) para observar y comparar los patrones de recuperación que sigue cada una de sus clases.

5.1.- Antecedentes

Existen estudios de varios autores que utilizan el Normalized Burn Ratio (NBR) para delimitar el área afectada por incendios y el Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) para analizar la regeneración vegetal. Algunos se limitan a delimitar el perímetro del incendio (Nieto Masot *et al.*, 2011; Dorrego y Álvarez, 2009; Oumar, 2015); otros utilizan parcelas experimentales para comparar la regeneración vegetal de dos ambientes climáticos contrastados como el semiárido y el submediterráneo (Montorio Llovería *et al.*, 2007); otros analizan la regeneración en base a los niveles de severidad del incendio (García Martínez y Pérez-Cabello, 2015); otros añaden al análisis de regeneración vegetal factores como la elevación y el pendiente (Romo León *et al.*, 2012); otros estudian la influencia de los factores topográficos en la regeneración vegetal de áreas quemadas (Pardo Pascual *et al.*, 2001) y otros se centran en la regeneración de especies concretas como el *Pinus halepensis* (Vicente-Serrano *et al.*, 2011). En este trabajo se aborda un análisis que combina diversos factores que pueden afectar a la regeneración vegetal como son el tipo de vegetación, elevaciones, pendientes, orientaciones y recurrencia o no del incendio.

5.2.- Área de estudio

El área de estudio de este trabajo es la zona afectada por el incendio forestal de Andratx de 2013. Se encuentra en el suroeste de Mallorca (Islas Baleares), en la parte más meridional de la Serra de Tramuntana. Se trata de 2.258 hectáreas, de las cuales 4'8 están cubiertas por vegetación de acebuche, 105'7 por cultivos, 211 por garriga, 1.115'5 por matorral y 821 por pinar. Un 91'6% de la superficie quemada corresponde al municipio de Andratx, un 8% corresponde al municipio de Estellencs y un 0'4% a Calvià. Esta zona es de un gran valor ecológico, por lo que se encuentra protegida por varias figuras LIC. Además, un 55% del total afectado forma parte del Paraje Natural de la Serra de Tramuntana y un 95% está catalogado como Zona de Alto Riesgo (ZAR) en el IV Plan General de Defensa contra Incendios Forestales de las Islas Baleares.

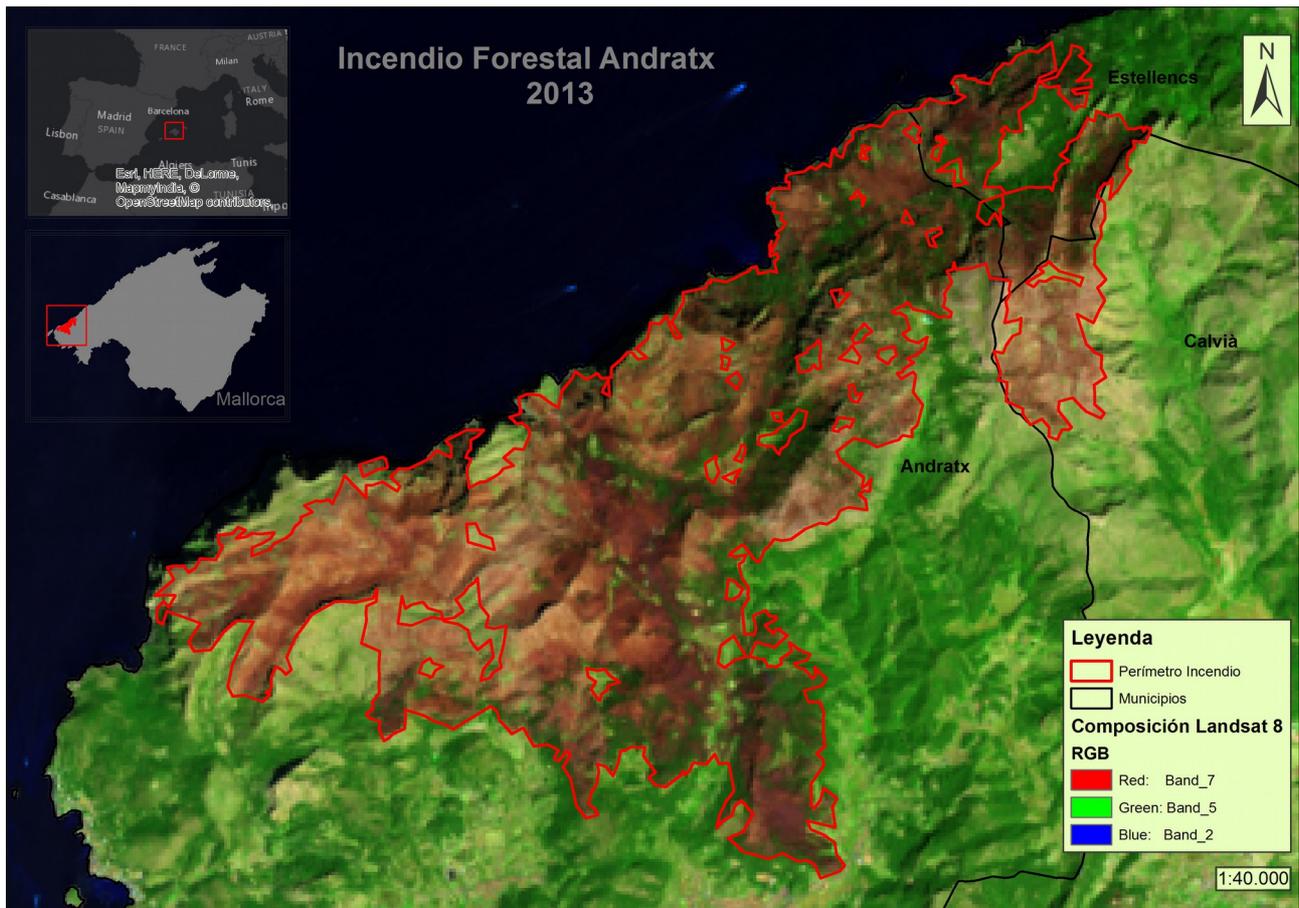


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

El clima de esta zona es el mediterráneo (Csa en la clasificación de Köppen-Geiger). La temperatura media anual se sitúa en torno a los 16°C y la precipitación media anual se encuentra entre los 500 y los 600 mm. Los veranos son cálidos y secos, y la mayor parte de la precipitación se concentra en los meses de otoño e invierno.

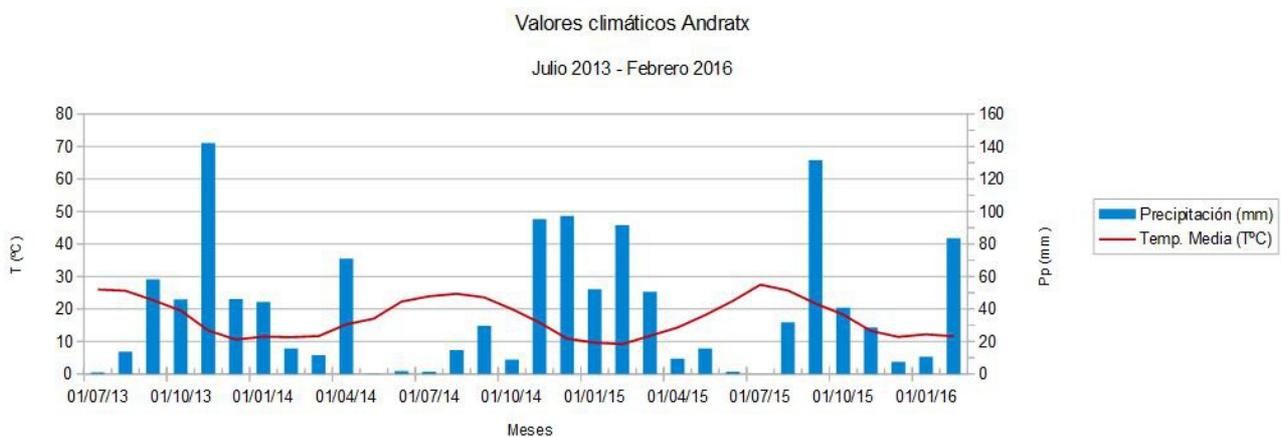


Figura 2. Valores climáticos mensuales de Andratx en el periodo de estudio.

Mapas de factores

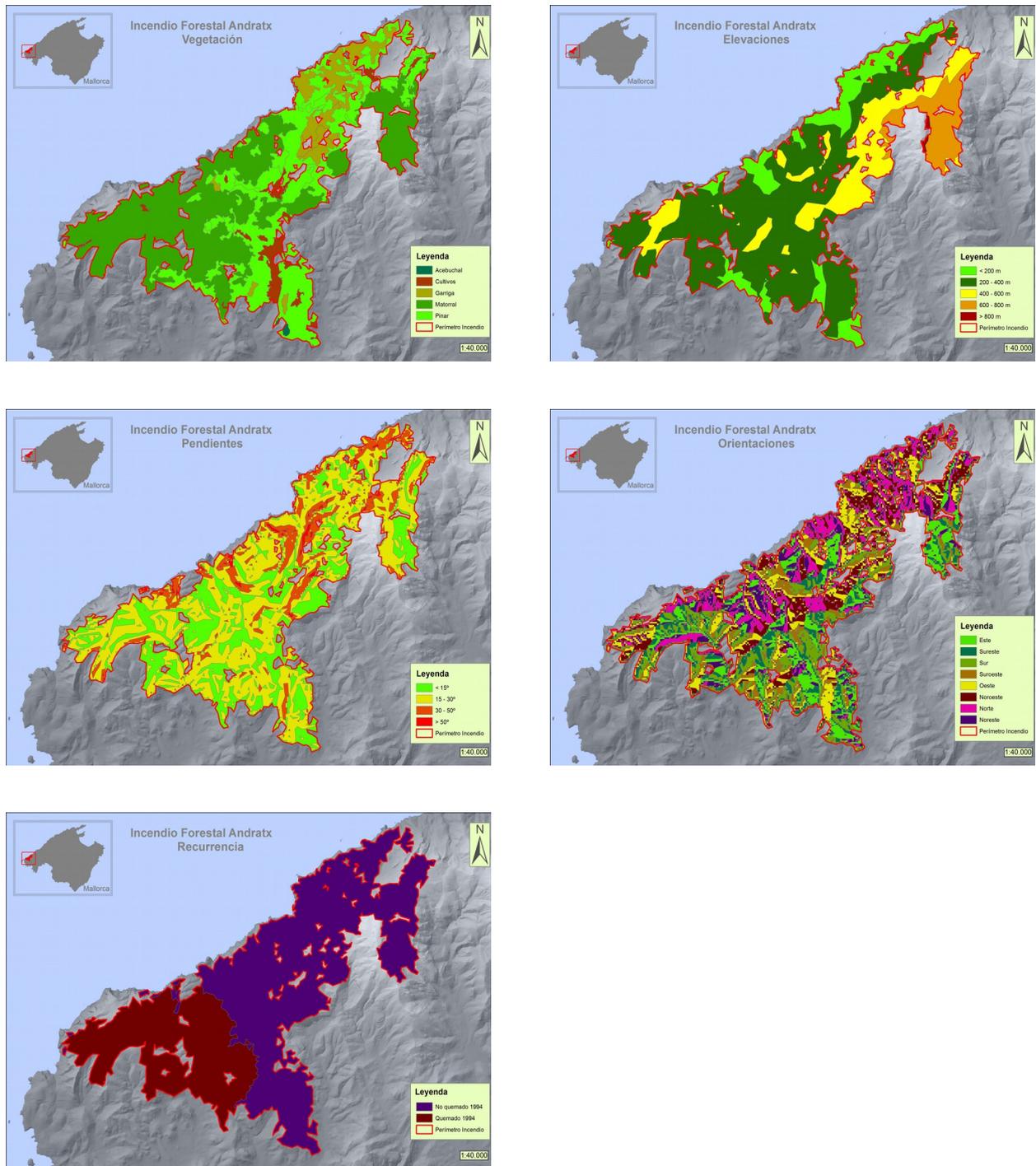


Figura 3. Mapas de factores en el área de estudio.

Los factores analizados en este estudio son vegetación, elevaciones, pendientes, orientaciones y recurrencia (según si la zona se quemó en el anterior incendio, en 1994, o no).

Gráficos de superficies por factores

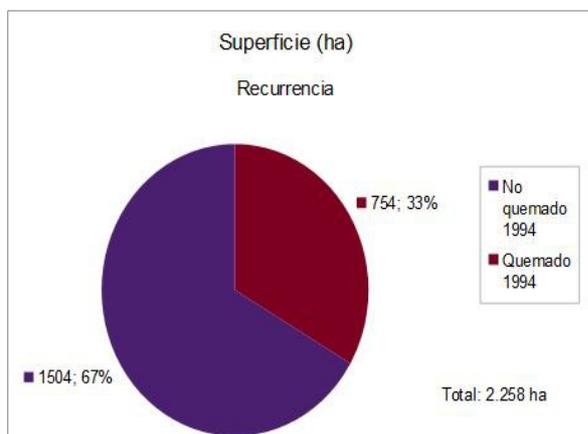
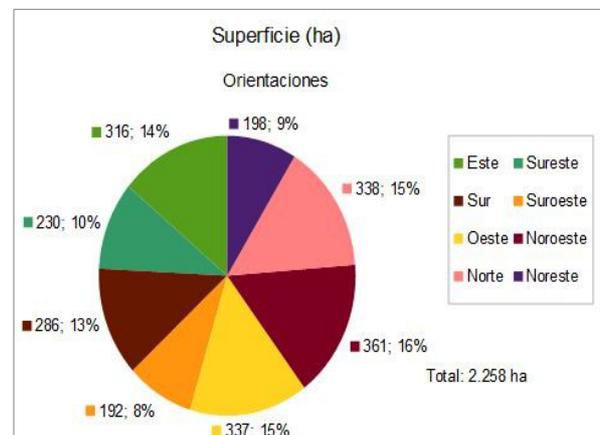
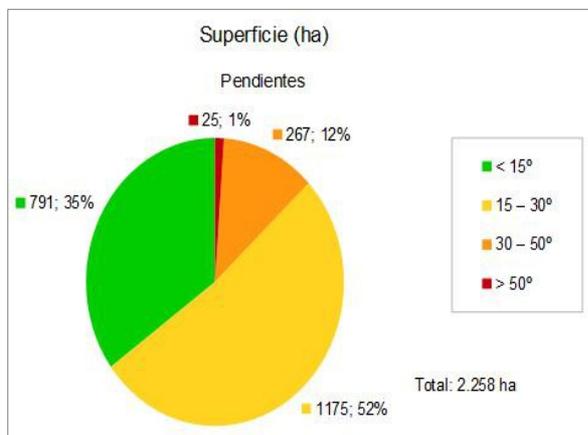
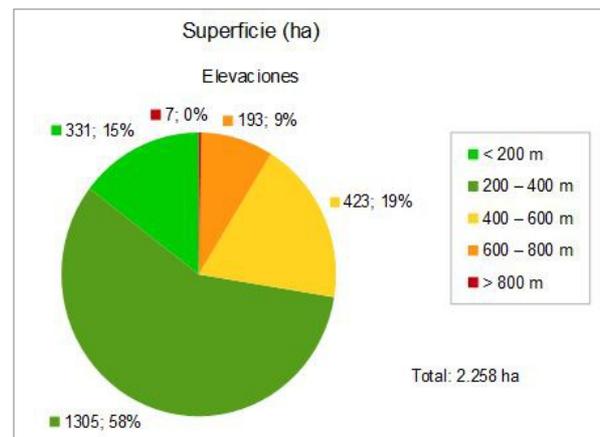
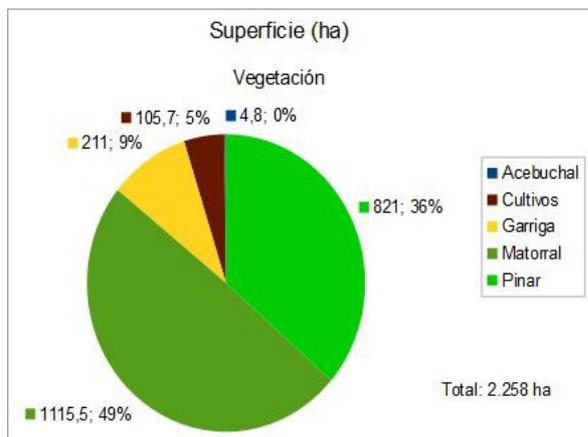


Figura 4. Gráficos de superficie por factores.

La Figura 4 muestra la superficie que ocupa cada clase de cada factor. El porcentaje de superficie que ocupa cada clase será importante para conocer la influencia que tendrá sobre la media.

6.- Justificación

Dada la importancia que tienen los incendios forestales en los ambientes mediterráneos, se ha considerado oportuno realizar este estudio para comprobar cómo se regeneran las áreas quemadas en función de su vegetación y características físicas.

El incendio forestal de Andratx del año 2013 fue suficientemente extenso como para contener una gran variedad de especies vegetales, así como de elevaciones, pendientes y orientaciones.

El uso de los SIG y la Teledetección para analizar los espacios naturales ha permitido que durante los últimos años hayan ido apareciendo nuevos métodos, índices, estudios, etc. Los índices utilizados en este estudio han sido antes utilizados y contrastados por varios autores (Nieto Masot *et al.*, 2011; Dorrego y Álvarez, 2009; Oumar, 2015; García Martínez y Pérez-Cabello, 2015; etc.)

La metodología utilizada se ha basado en discriminar la regeneración vegetal por distintos factores ecológicos y fisiográficos, a través de máscaras, para comprobar cómo se comporta la vegetación en función de sus características.

7.- Metodología

7.1.- Tratamiento previo de las imágenes de satélite

Las imágenes utilizadas se han obtenido a través del *United States Geological Survey* (USGS) y se han corregido radiométrica y topográficamente, con una resolución de 30 x 30 metros. Se trata del producto Level 1, imágenes ya georreferenciadas.

Para realizar la corrección radiométrica se ha utilizado el método del "Objeto oscuro". Para ello se han convertido los Niveles Digitales (ND) de las imágenes a valores de radiancia utilizando la siguiente fórmula:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en el techo de la atmósfera

M_L = Factor multiplicativo de cambio de escala de banda específico de los metadatos

A_L = Factor aditivo de cambio de escala de banda específico de los metadatos

Q_{cal} = Valores de los píxeles de productos estándar cualificados y cuantificados (ND)

Una vez obtenidos los valores de radiancia se han convertido a valores de reflectancia mediante la fórmula

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho}$$

donde:

ρ_{λ}' = Reflectancia planetaria en el techo de la atmósfera, sin corrección para el ángulo solar

M_{ρ} = Factor multiplicativo de cambio de escala de banda específico de los metadatos

A_{ρ} = Factor aditivo de cambio de escala de banda específico de los metadatos

Q_{cal} = Valores de los píxeles de productos estándar cualificados y cuantificados (ND)

A continuación, para obtener la reflectancia con la corrección para el ángulo solar, se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}$$

donde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria en el techo de la atmósfera

θ_{SE} = Elevación local del ángulo solar, proporcionado en los metadatos

θ_{SZ} = Ángulo cenital solar local; $\theta_{SZ} = 90^\circ - \theta_{SE}$

7.2.- Delimitación del área quemada

Para realizar la delimitación del incendio de Andratx de julio de 2013 se han utilizado imágenes del satélite Landsat 8. Concretamente, las imágenes de los días 21 de julio de 2013 (pre-incendio) y 22 de agosto de 2013 (post-incendio).

Para poder discriminar el área quemada se ha utilizado el índice NBR (Neutralized Burn Ratio), definido por Key y Benson (1999) y utilizado por diversos autores para el cálculo de la superficie quemada (Key y Benson, 1999; Chuvieco *et al.*, 2002; Martín *et al.*, 2002).

Este índice se elabora a partir de la diferencia entre la reflectividad de la banda correspondiente al Infrarrojo Cercano y la banda correspondiente al Infrarrojo Lejano de cada imagen, para después calcular la diferencia entre éstas.

Para realizar el cálculo del área quemada, se ha utilizado la siguiente fórmula en la imagen pre-incendio y post-incendio:

$$NBR = \frac{IC - IL}{IC + IL}$$

donde:

IC = Infrarrojo Cercano

IL = Infrarrojo Lejano

Una vez obtenido el NBR de cada imagen, se calcula la diferencia entre ambos:

$$NBR_d = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

donde:

NBR_d = diferencia entre NBR pre-incendio y NBR post-incendio

NBR_{pre} = NBR de la imagen pre-incendio

NBR_{post} = NBR de la imagen post-incendio

El resultado es una imagen donde se distingue el área quemada. A partir de esta imagen, se ha hecho una clasificación no supervisada con el método Maximum Likelihood Classification, mediante el cual se obtienen dos clases: área quemada y área no quemada. Este método consiste en obtener muestras de píxeles "quemados" y "no quemados" para que automáticamente se

asigne una de las clases consideradas a cada píxel de la imagen según su valor (diferencia entre el NBR pre y post incendio). El resultado es una capa en formato ráster formada por dos clases: área quemada y área no quemada. Finalmente, se ha convertido esta capa a formato vectorial, considerando solamente el área quemada, para después simplificar los bordes. El resultado es una capa en formato vectorial que se ajusta a la extensión del área quemada (2.258 hectáreas).

7.2 Cálculo y Evolución del NDVI

Para calcular la evolución de la cobertura vegetal se han utilizado imágenes del satélite Landsat 8, desde el 21 de Julio de 2013 (cinco días antes del incendio, para conocer el estado previo de la vegetación) hasta el 20 de Febrero de 2016. Se ha utilizado una imagen de cada mes, eliminando del estudio las imágenes donde aparecen nubes. De esta manera, el estudio está compuesto por 19 imágenes, aunque su cobertura temporal es de 35 meses. Por tanto, en los meses donde no ha sido posible obtener el NDVI, éste se ha estimado a partir de una media móvil. Las imágenes se han procesado y corregido de la misma manera que las utilizadas para el cálculo del índice NBR y tienen la misma resolución espacial (30 x 30 metros).

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) es una medida para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Se basa en la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación refleja hasta un sensor remoto. En este caso, se ha utilizado el sensor OLI del satélite Landsat 8. Cuanta más actividad fotosintética tiene la cobertura vegetal, más reflectividad tiene en la banda del Infrarrojo Cercano, mientras que cuanto más senescente sea, más reflectividad tiene en la banda del Rojo. Por tanto, se realiza un ratio entre estas dos bandas para saber el estado de salud de la cobertura vegetal. La fórmula para realizar este cálculo es la siguiente:

$$NDVI = \frac{IC - Rojo}{IC + Rojo}$$

donde:

IC = Infrarrojo Cercano

Rojo = Banda del espectro electromagnético correspondiente al color Rojo

Como resultado, se obtienen valores de NDVI comprendidos entre 0 y 1, siendo 0 el mínimo de salud y 1 el máximo.

Esta fórmula se ha aplicado a cada una de las 19 imágenes de Landsat 8 obtenidas, para luego aplicar una máscara en función de cada factor (vegetación, elevaciones, pendientes, orientaciones, recurrencia). Para realizar el mapa de vegetación se ha utilizado el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50), correspondiente al Tercer Inventario Forestal Nacional (3IFN). Una vez creadas todas las máscaras para cada clase de cada uno de los factores, se han representado cartográficamente los resultados. Seguidamente, se ha calculado el valor medio de cada una de las máscaras para realizar gráficos de evolución.

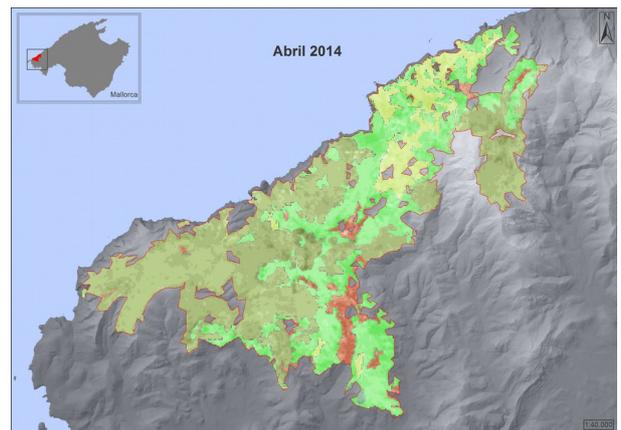
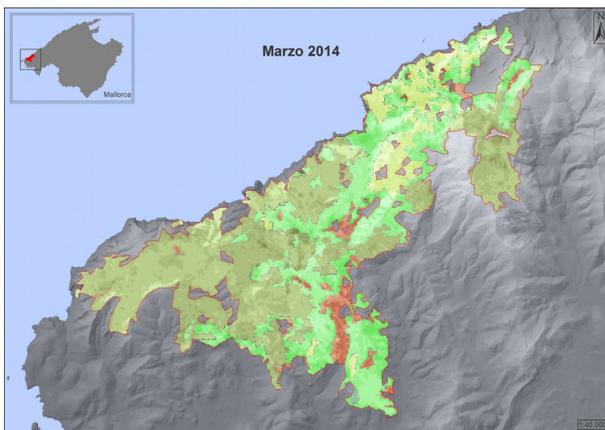
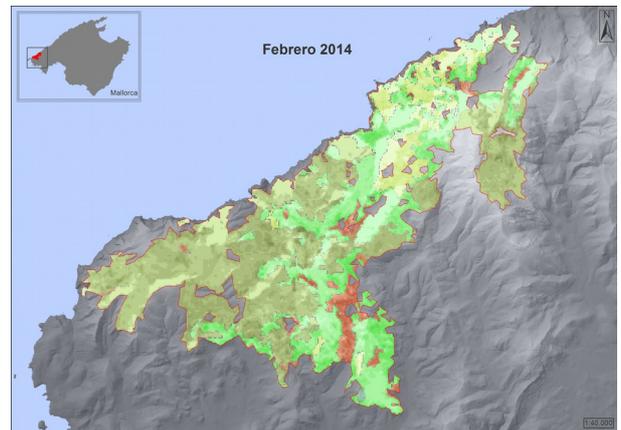
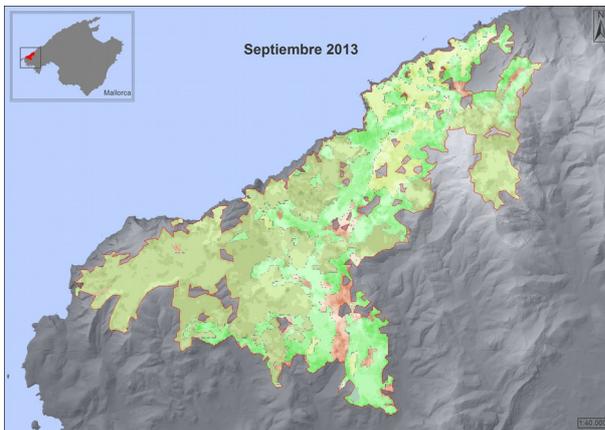
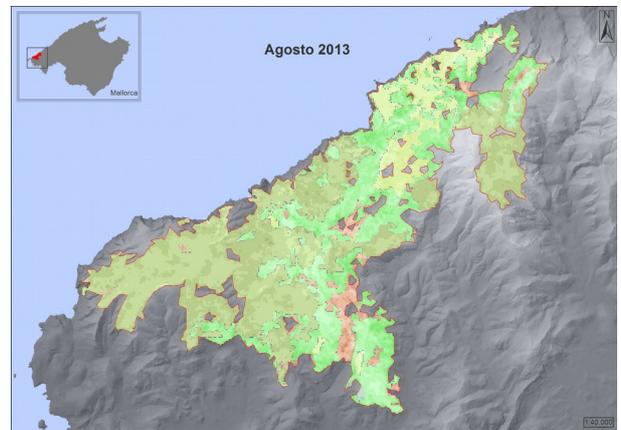
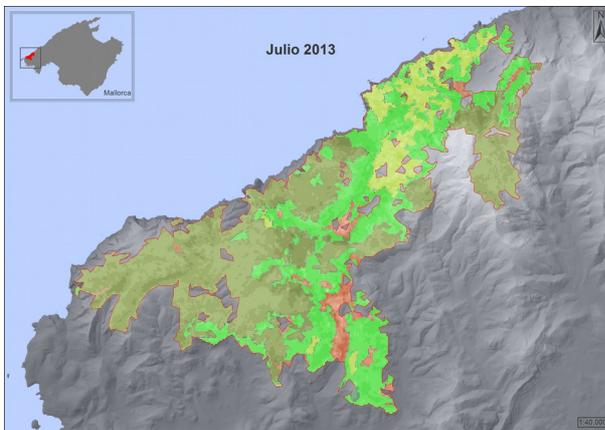
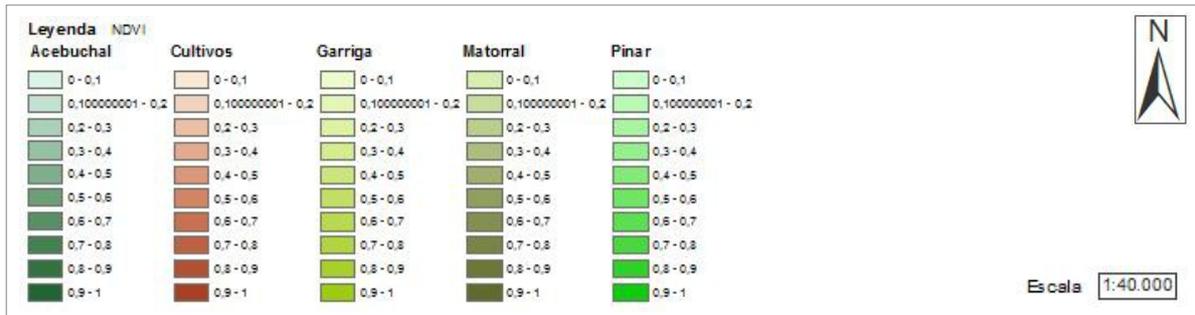
A continuación se detallan las imágenes de Landsat 8 obtenidas para realizar este estudio. *Path* y *Row* son, respectivamente, la columna y la fila de la pasada del satélite correspondiente a cada imagen.

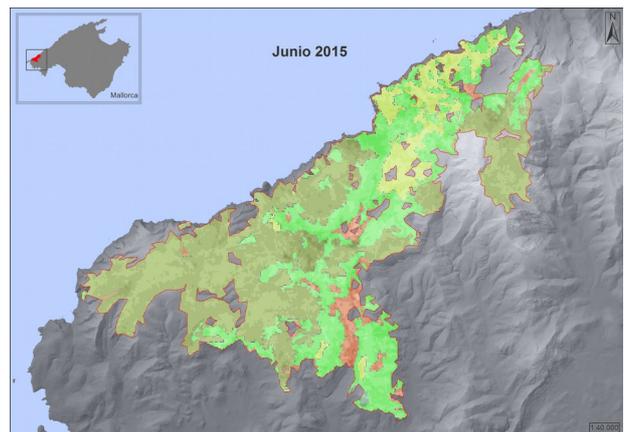
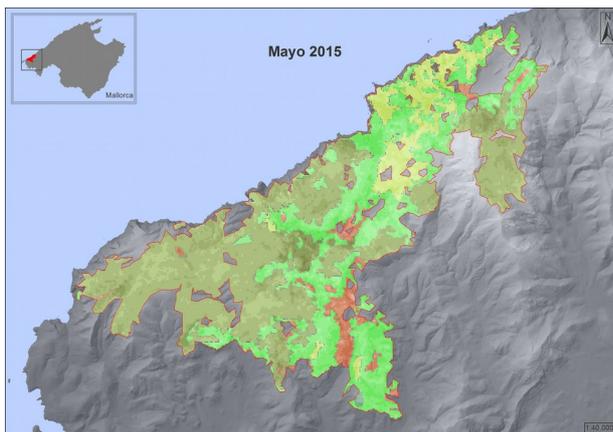
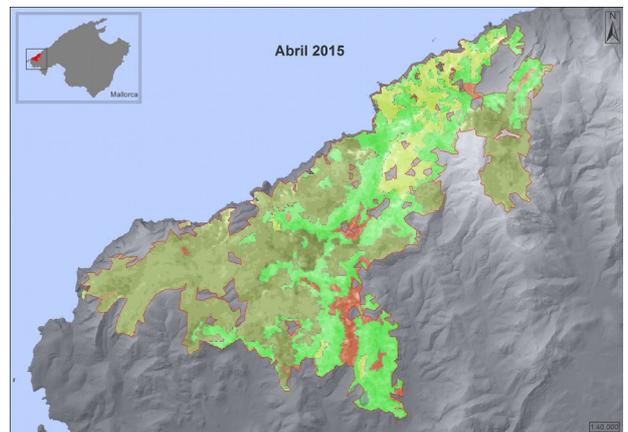
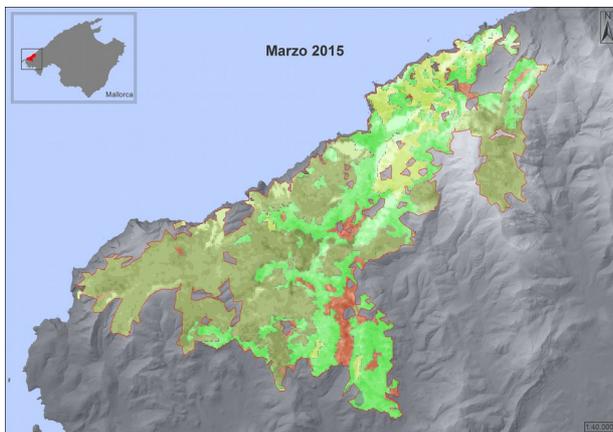
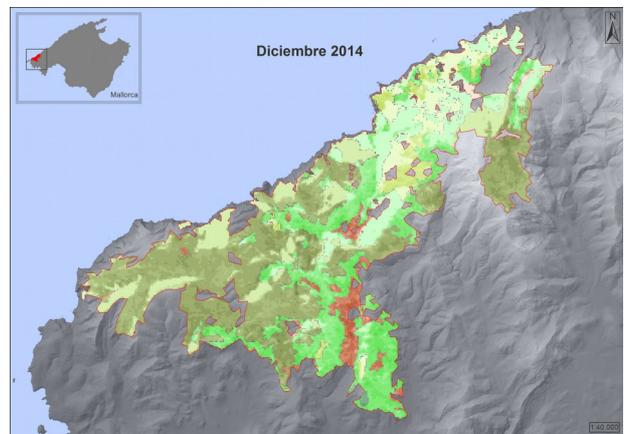
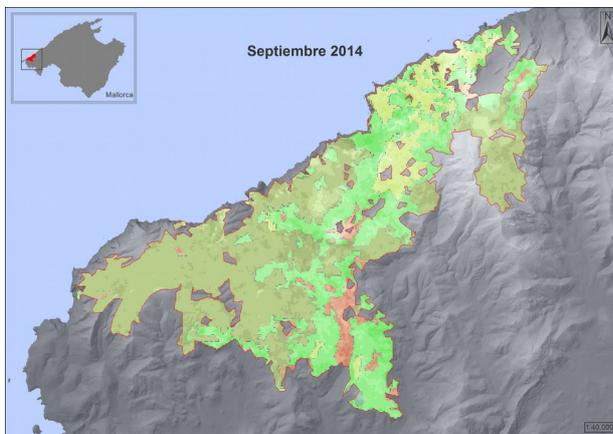
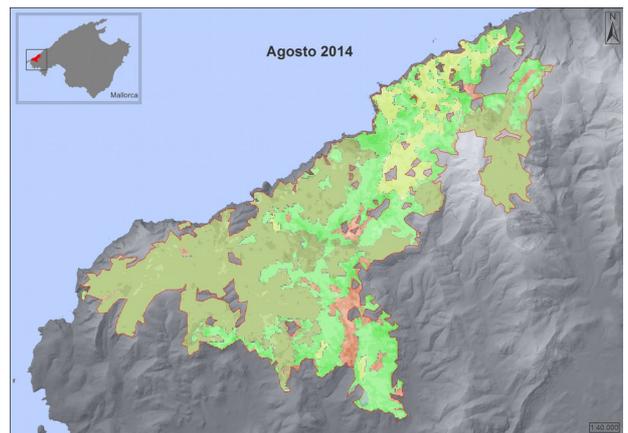
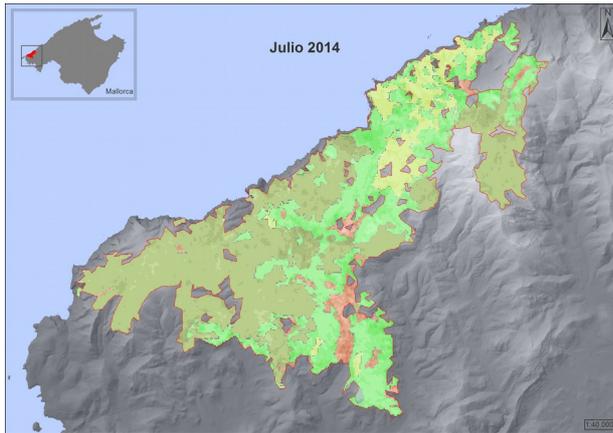
Fecha	Path	Row
21/07/2013 (pre-incendio)	197	32
22/08/13	197	32
23/09/13	197	33
14/02/14	197	32
18/03/14	197	32
19/04/14	197	32
08/07/14	197	32
09/08/14	197	32
10/09/14	197	32
31/12/14	197	32
05/03/15	197	32
06/04/15	197	32
08/05/15	197	32
09/06/15	197	32
11/07/15	197	32
12/08/15	197	32
16/11/15	197	32
18/12/15	197	32
20/02/16	197	32

Tabla 1. Imágenes Landsat 8 utilizadas.

8.- Resultados y discusión

8.1.- Evolución del NDVI por tipo de vegetación





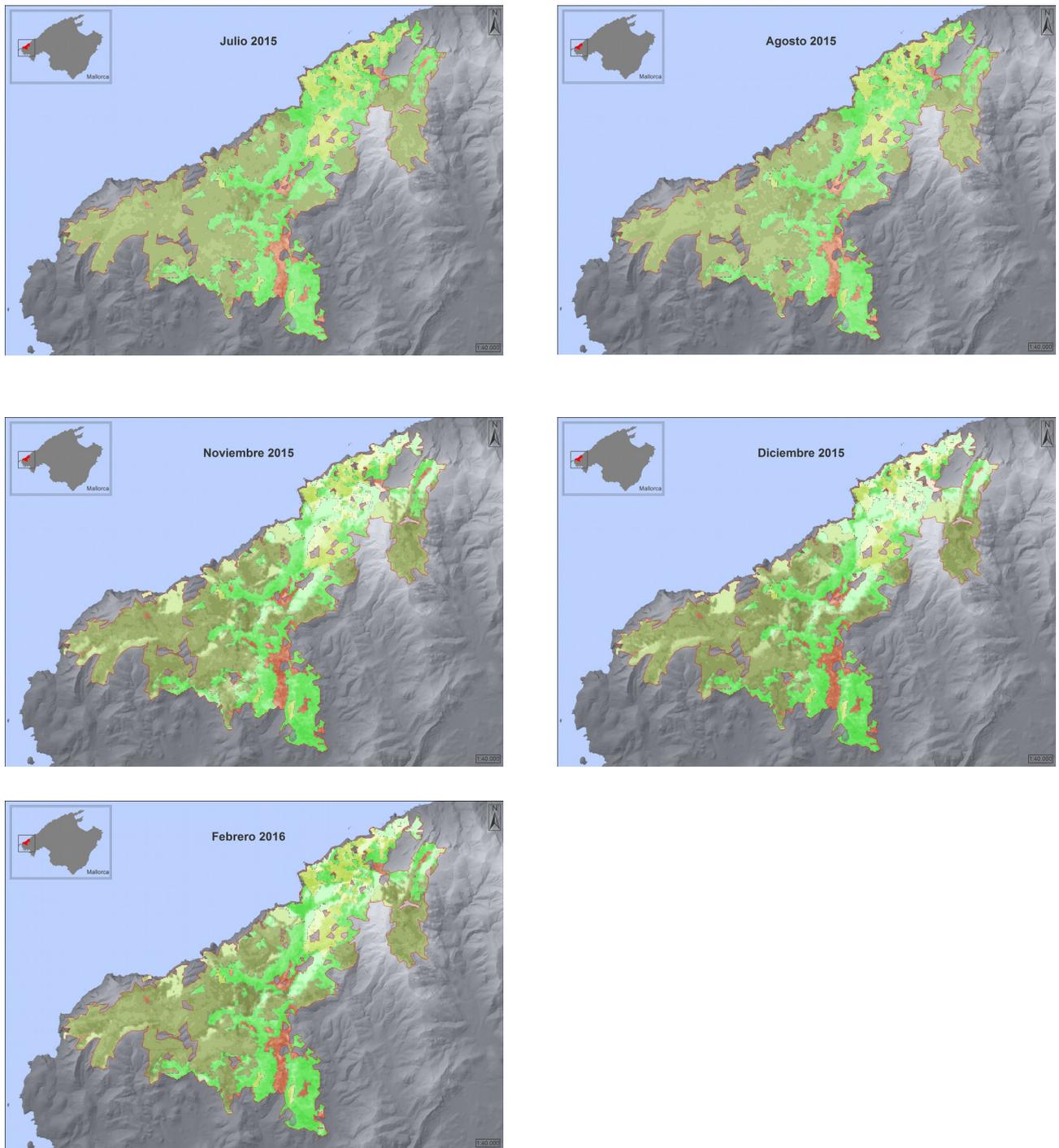


Figura 5. Mapas de evolución del NDVI por tipo de vegetación.

Evolución del NDVI por tipo de vegetación

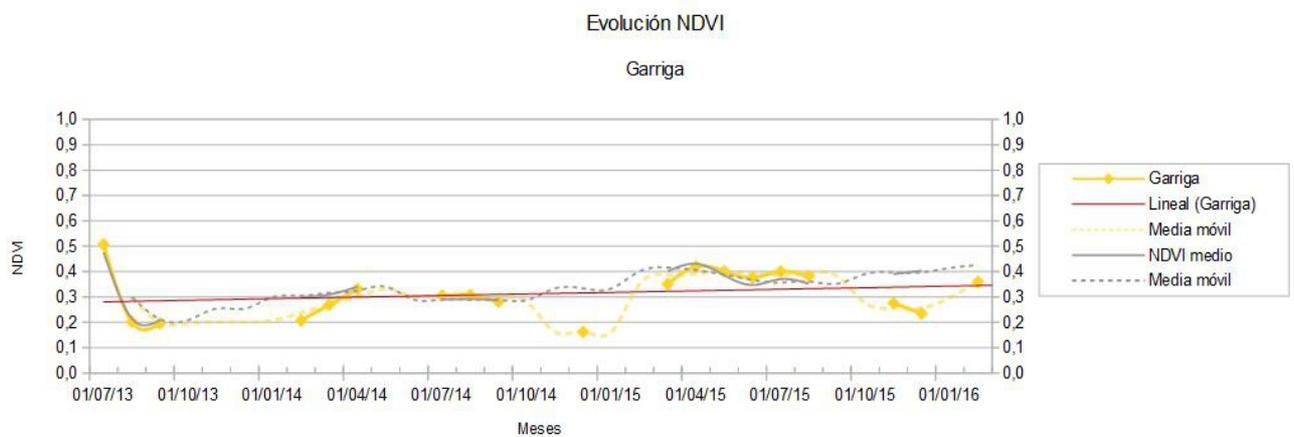
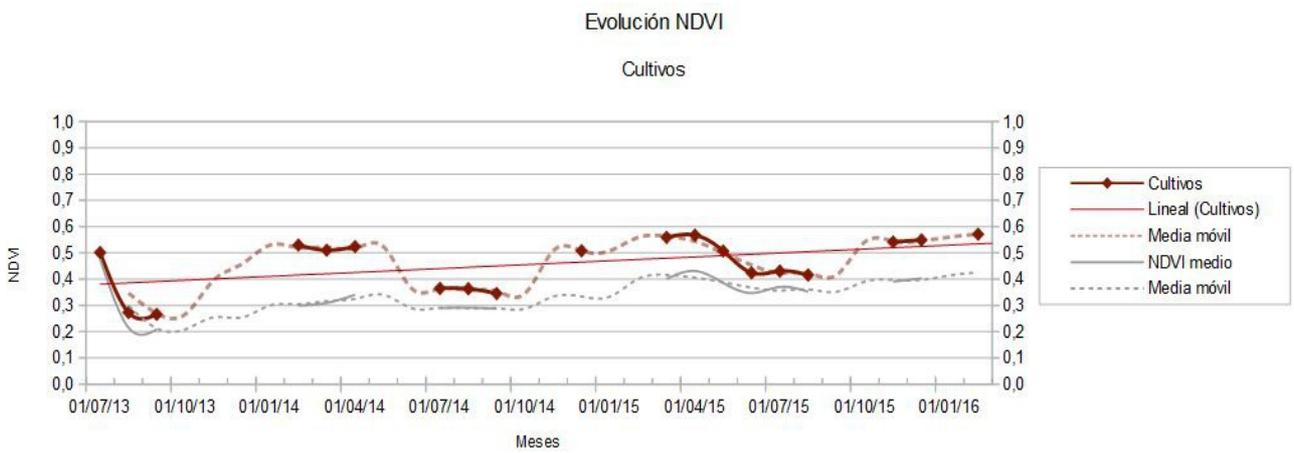
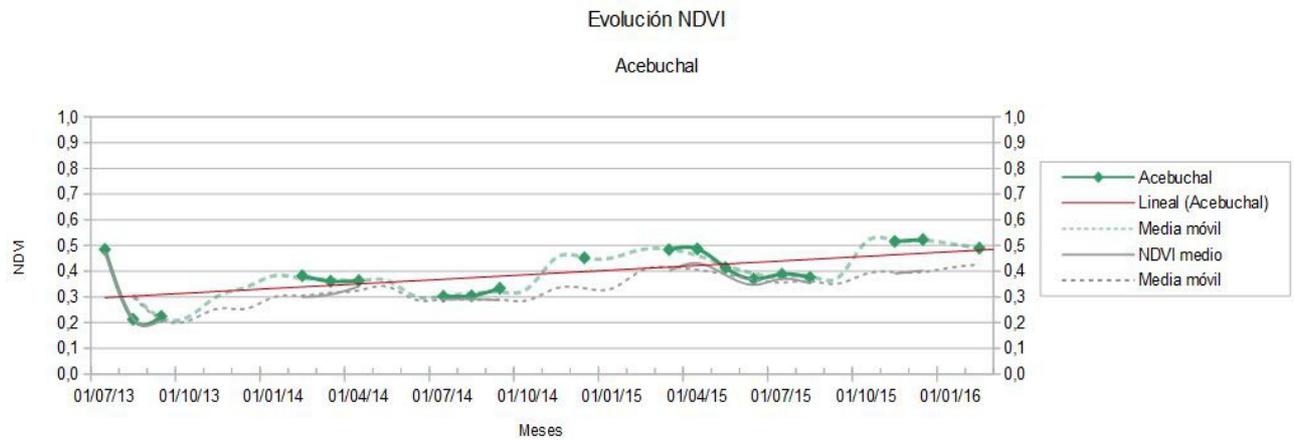




Figura 6. Gráficos de evolución del NDVI por tipo de vegetación.

Analizando la evolución del NDVI por tipo de vegetación, se puede observar que el acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*) es una especie muy resiliente, ya que en todo momento evoluciona con valores por encima de la media de toda el área de estudio y la tendencia es claramente positiva.

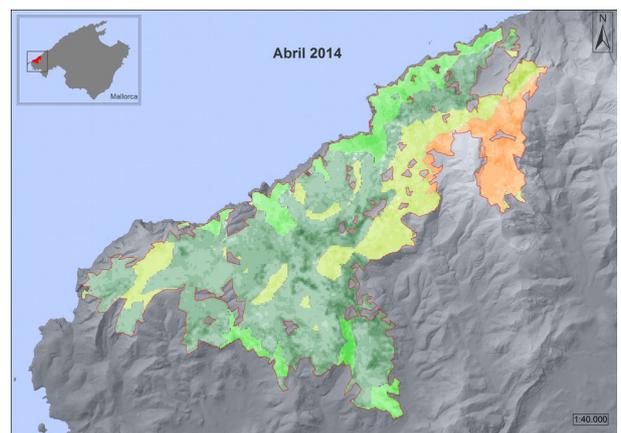
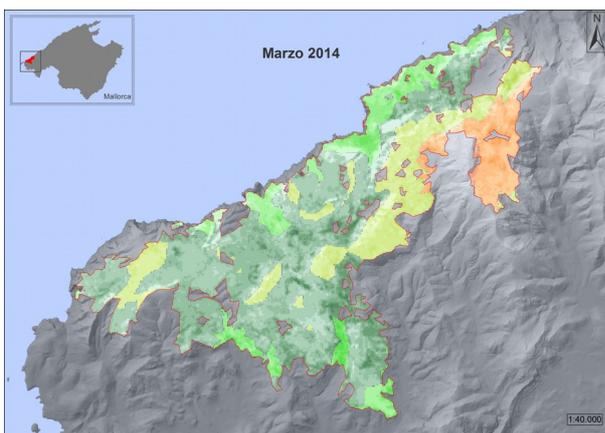
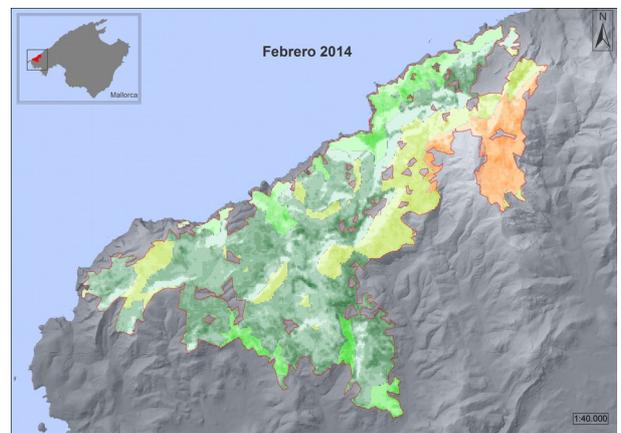
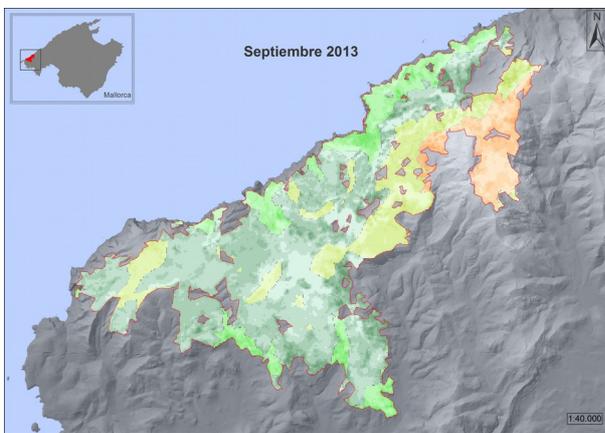
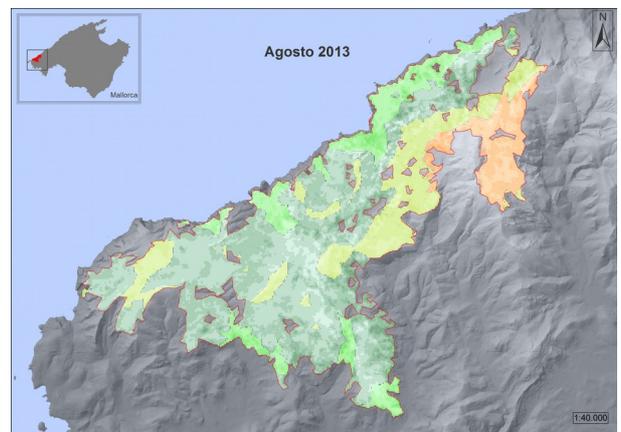
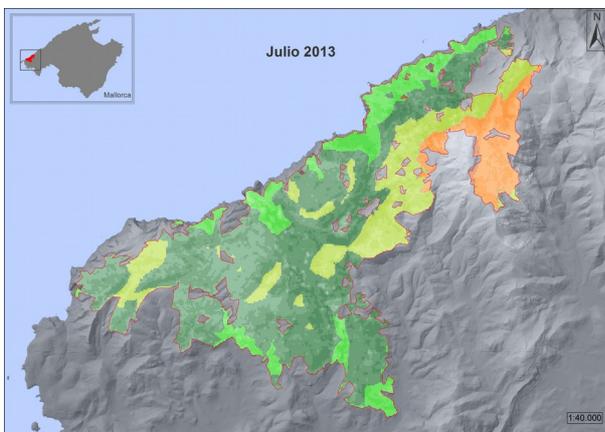
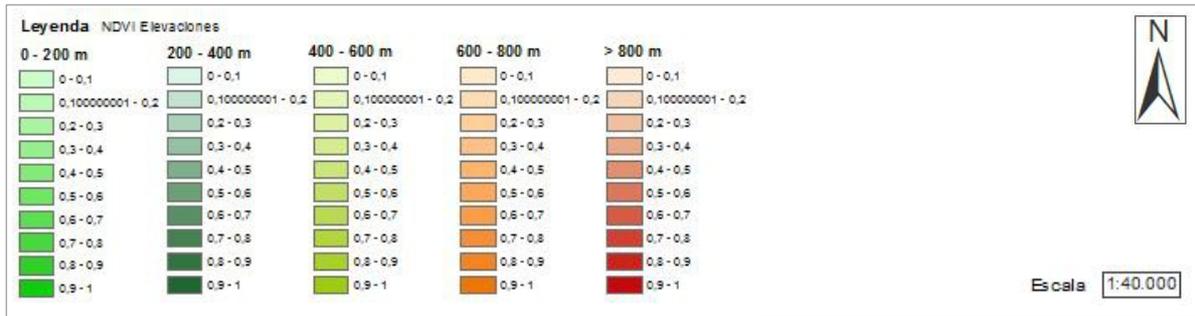
Los cultivos son la clase que mejor se recupera, aunque su regeneración y evolución depende en gran medida del factor humano. De todas formas, en el año 2015 tiene unos valores medios más altos que en 2014, por tanto también sufre los efectos del fuego en la composición y calidad del suelo.

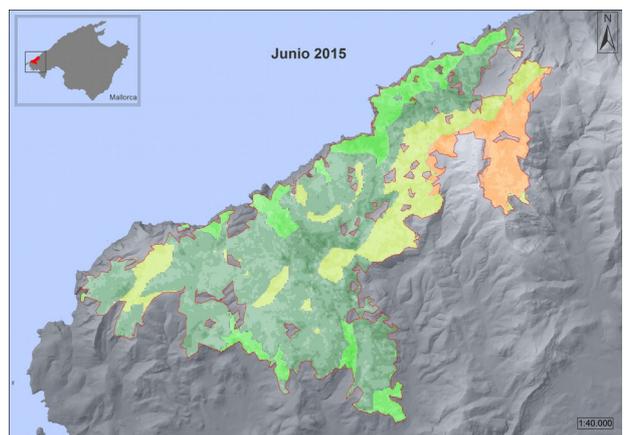
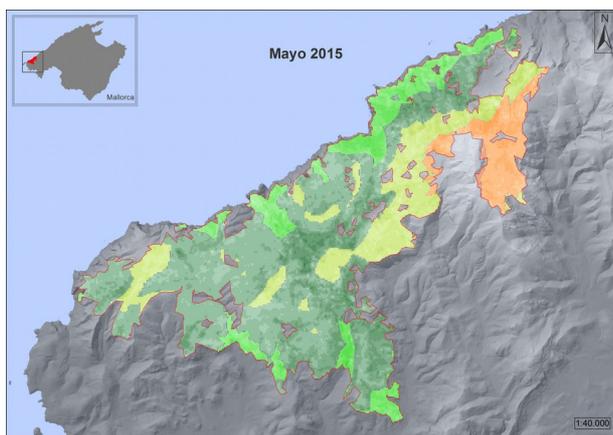
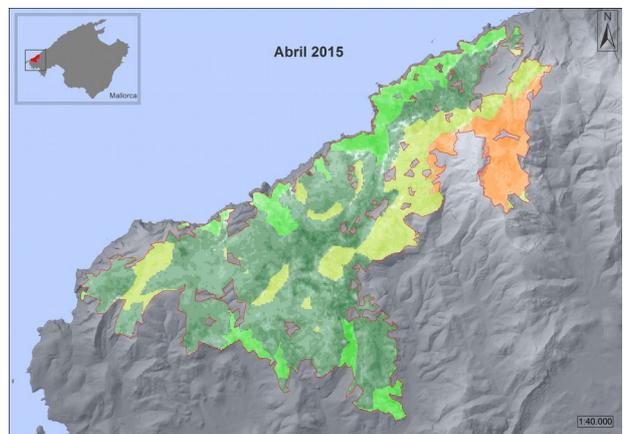
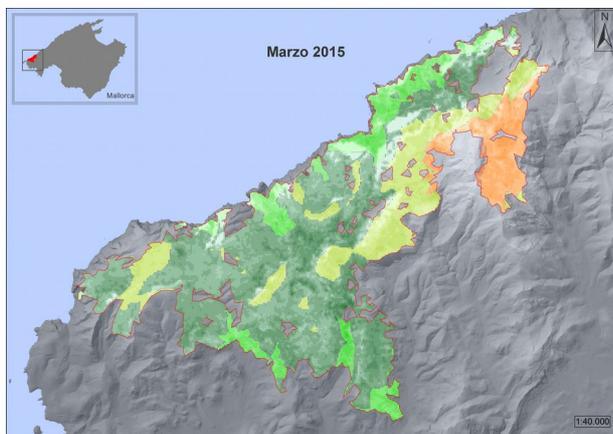
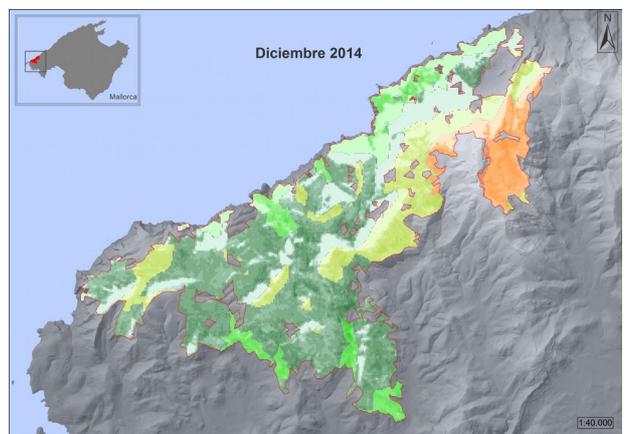
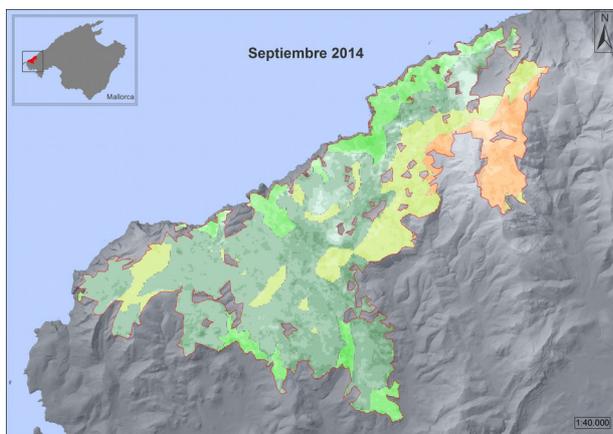
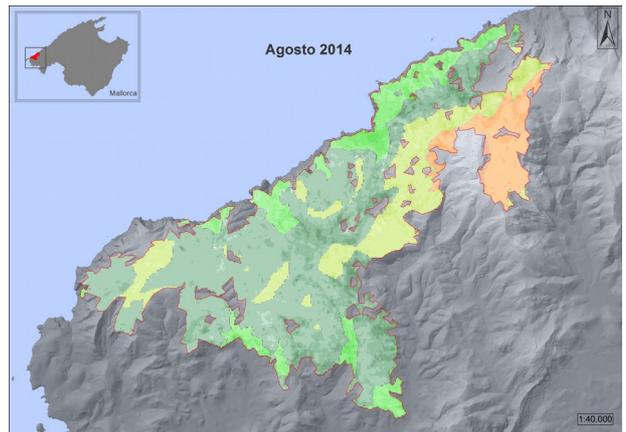
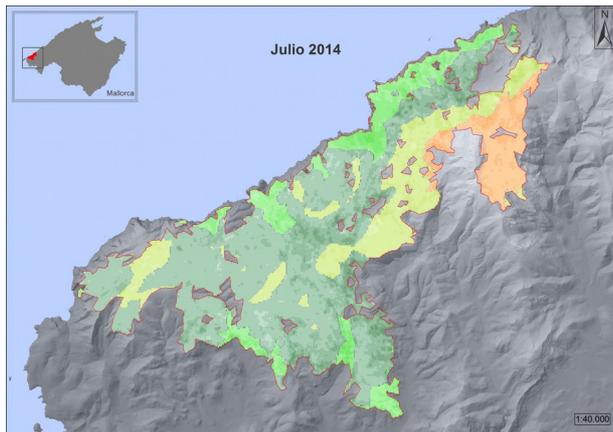
La garriga (formada por especies como *Chrysanthemum coronarium*, *Chamaerops humilis*, *Cistus albidus*, *Papaver rhoeas*, *Papaver somniferum*, *Cynara cardunculus*, *Foeniculum vulgare*, *Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis*, *Asparagus sp.*, *Urtica spp.*, etc.) es la formación vegetal que más le cuesta regenerarse, sobre todo durante los meses de invierno, aunque en primavera suele recuperar los valores hasta situarse en torno a la media. Los descensos pueden deberse a una falta de insolación por parte de esta formación vegetal durante el invierno.

El matorral (compuesto por arbustos) es la formación vegetal que más se ajusta a la media de toda el área de estudio, en gran parte porque ocupa un 49% de la superficie total analizada. Tiene una evolución positiva y constante, no hay muchas alteraciones entre las diferentes estaciones.

El pinar (formado principalmente por pino blanco, *Pinus halepensis*) también se ajusta bastante a la media (ocupa un 36% del área de estudio) aunque durante los meses de verano y otoño no sufre un descenso tan marcado. Este hecho puede deberse a una mayor capacidad de retención de humedad por parte de las raíces de los pinos.

8.2.- Evolución del NDVI por elevaciones





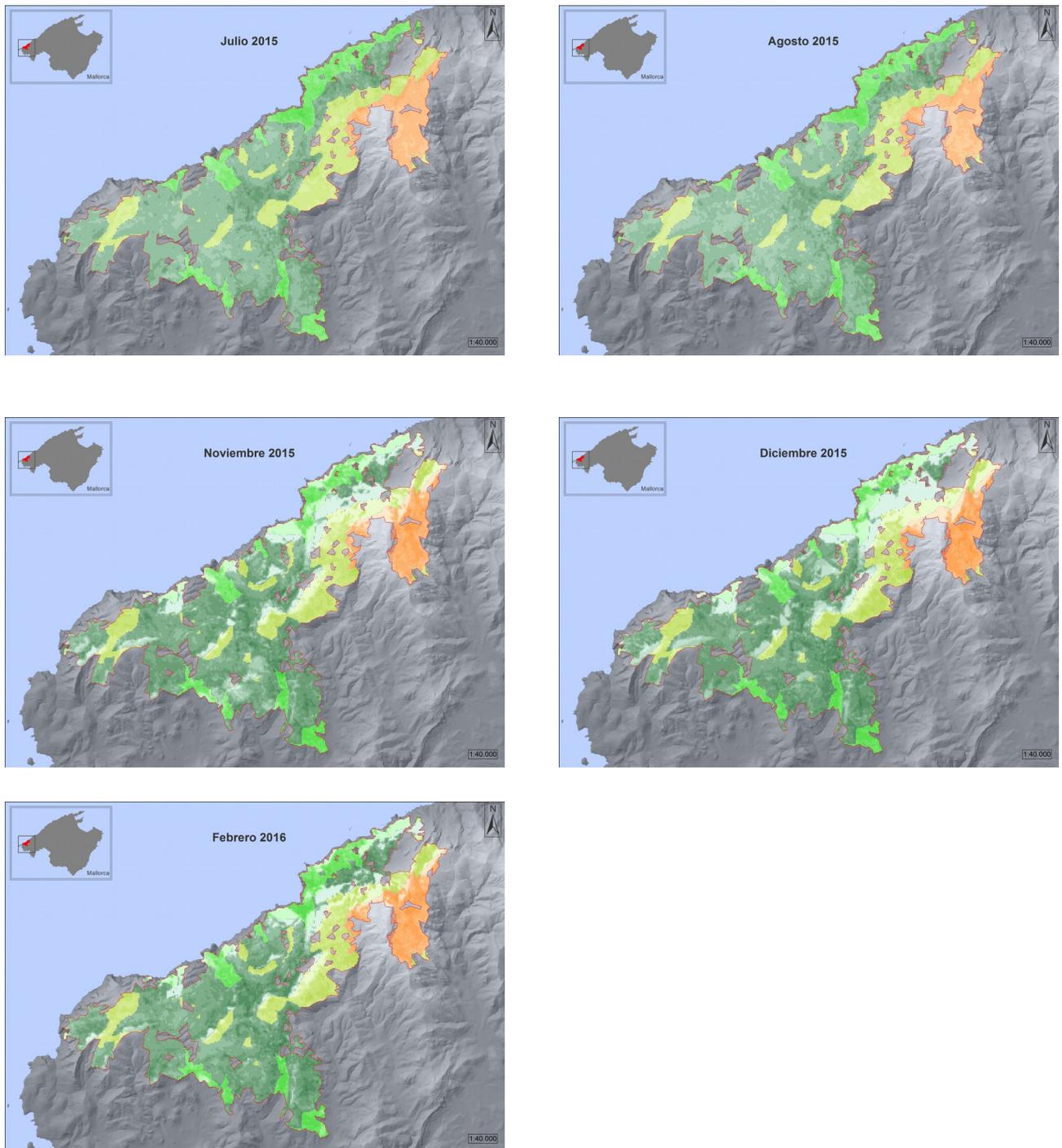
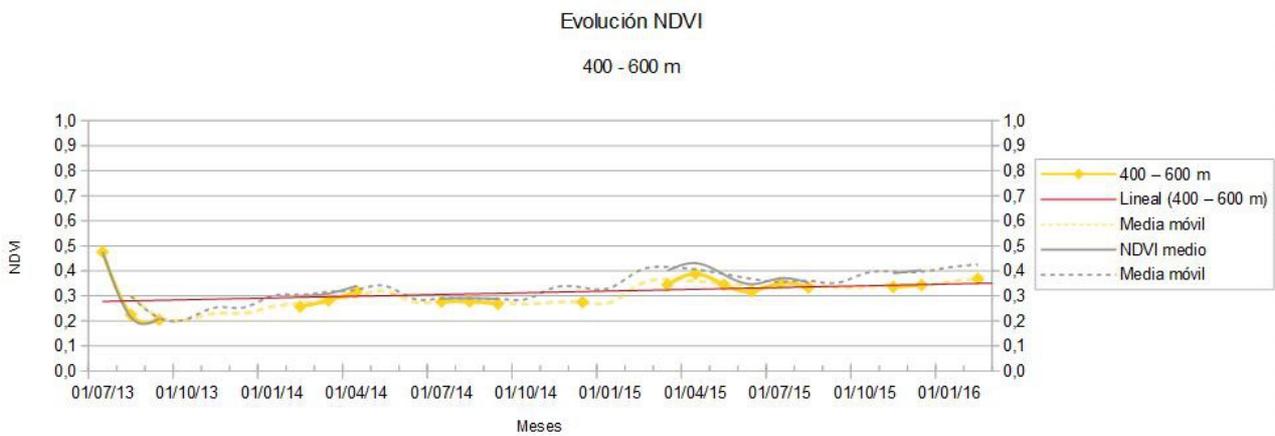
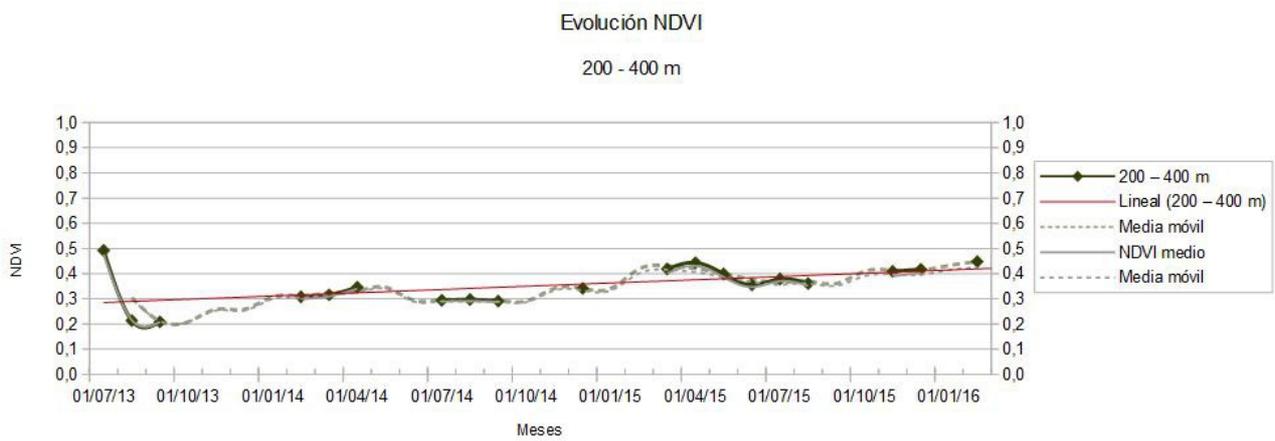
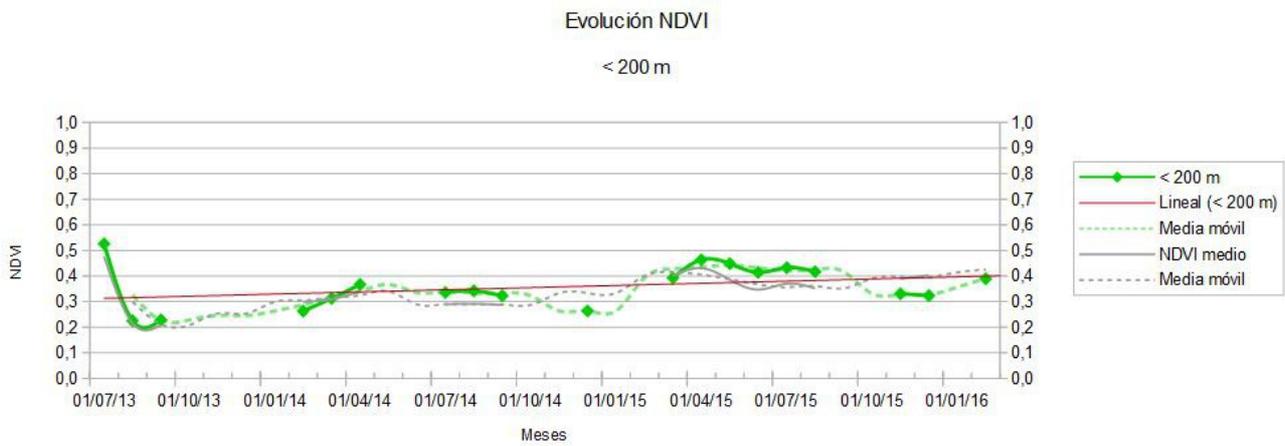


Figura 7. Mapas de evolución del NDVI por elevaciones.

Evolución del NDVI por elevaciones



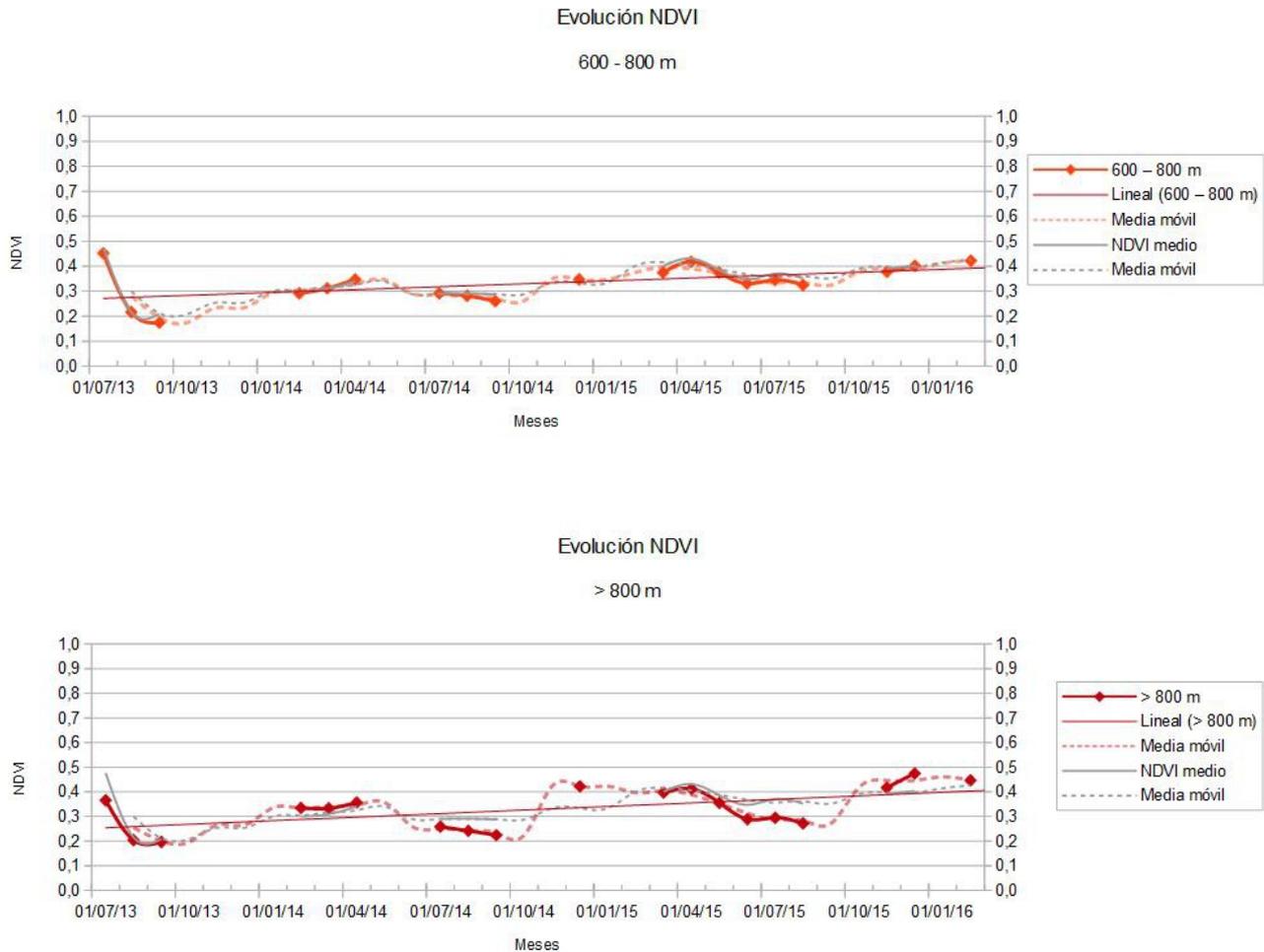


Figura 8. Gráficos de evolución del NDVI por elevaciones.

En cuanto a la evolución por elevaciones, las áreas con alturas menores a 200 metros se regeneran por encima de la media, aunque en otoño e invierno tienen unos valores ligeramente inferiores. Puede ser que estos ligeros descensos se relacionen con una menor cantidad de precipitación.

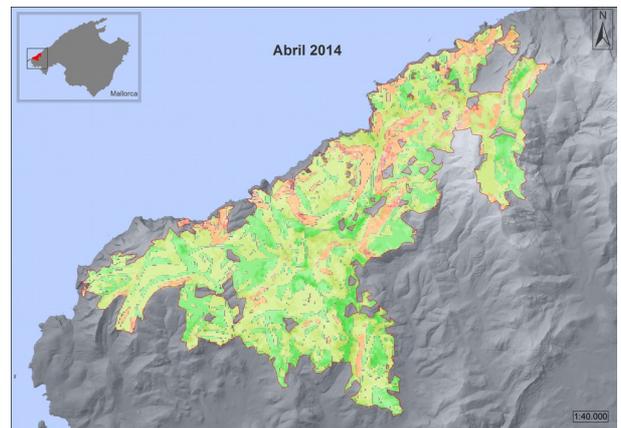
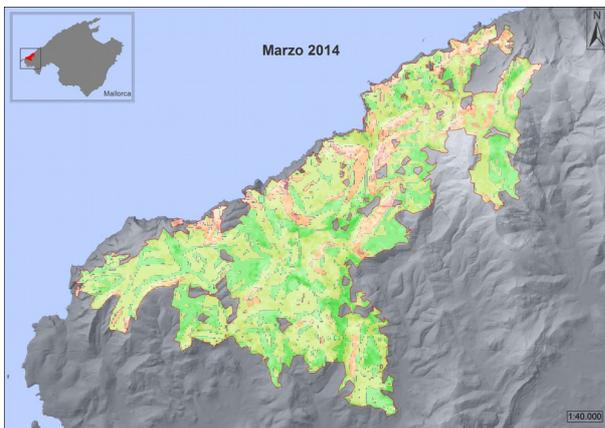
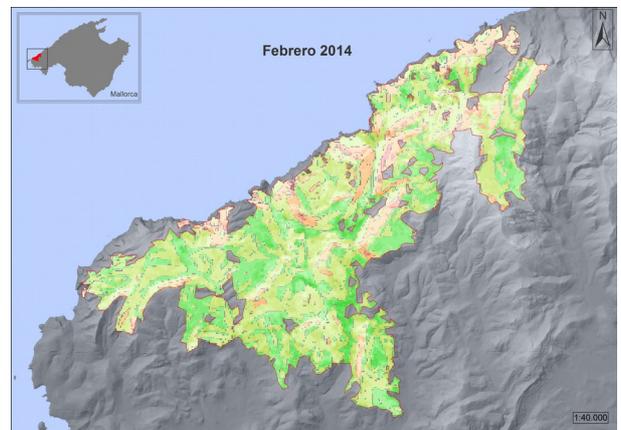
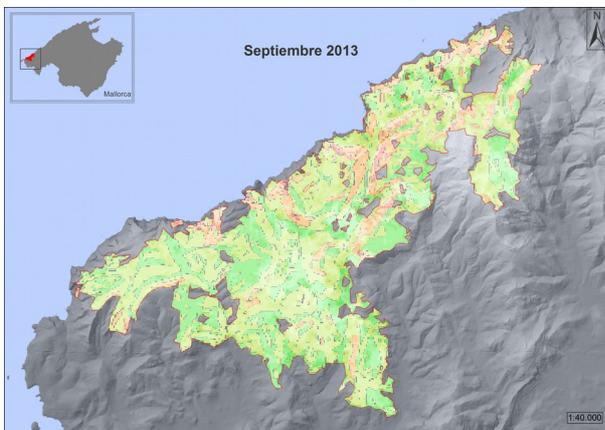
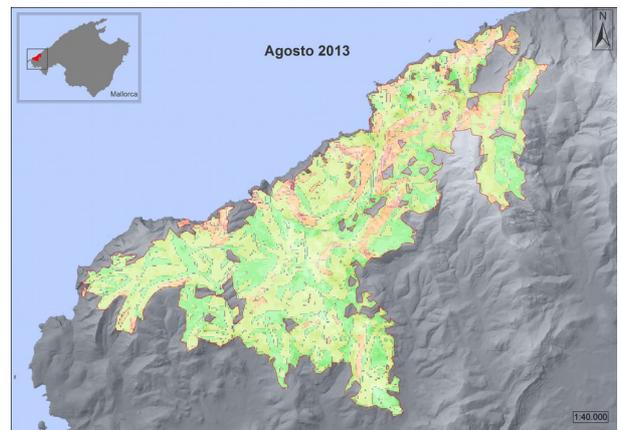
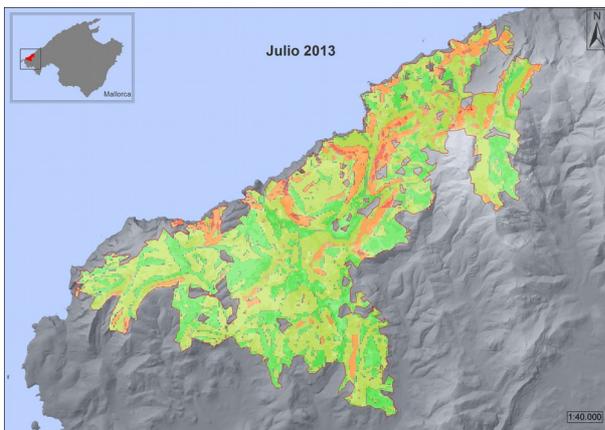
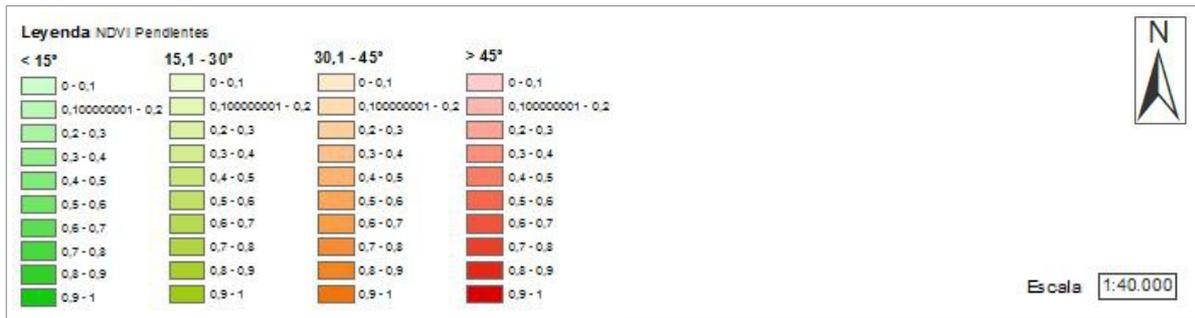
Entre 200 y 400 metros la regeneración vegetal se ajusta a la media. Este hecho se debe a que estas zonas ocupan el 48% del total del área de estudio.

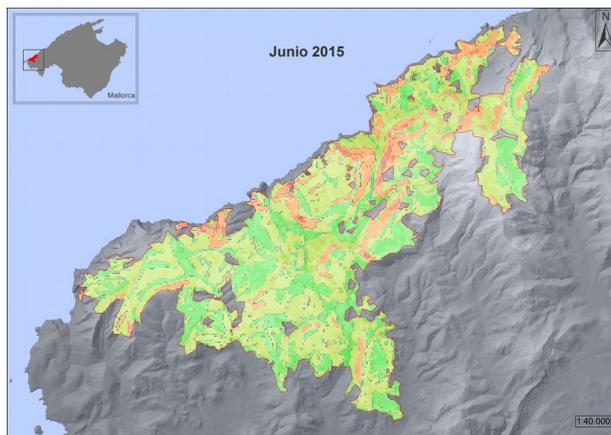
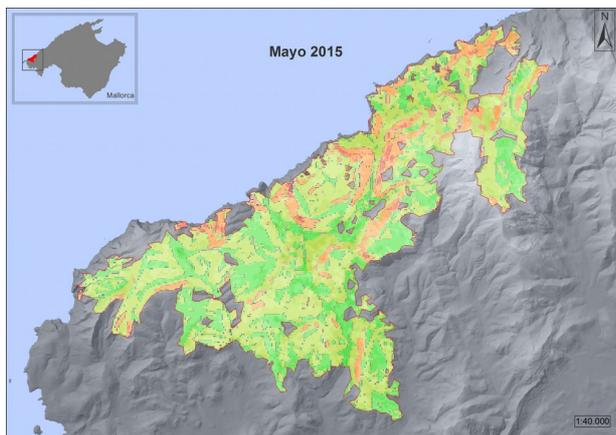
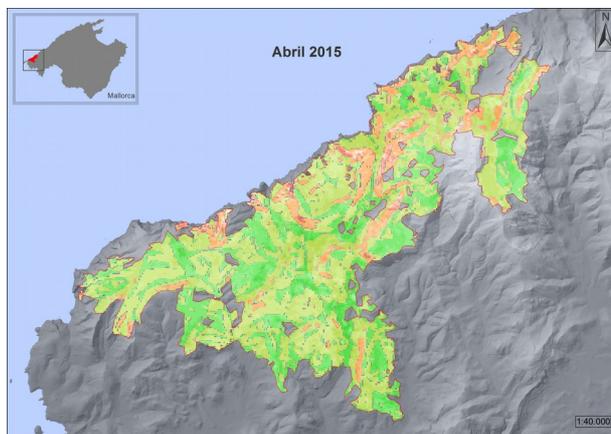
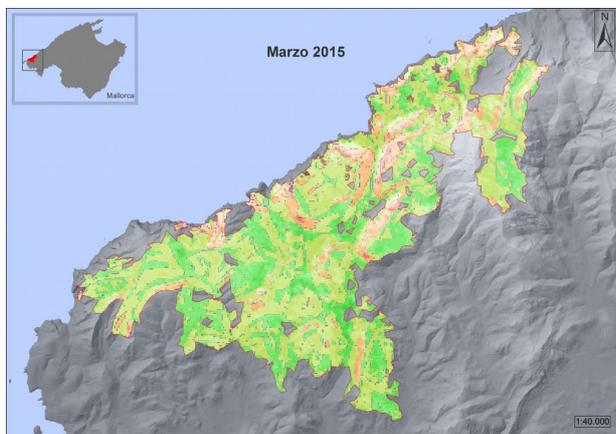
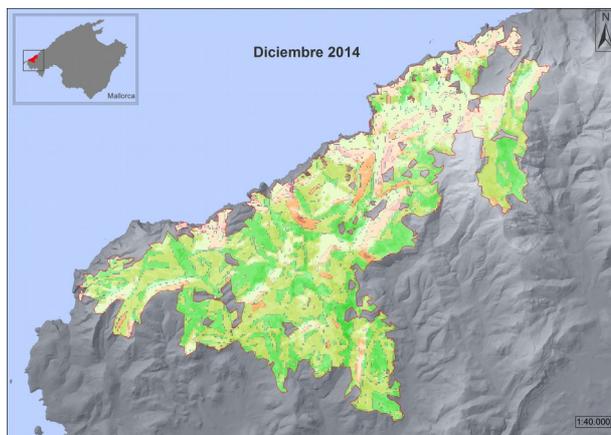
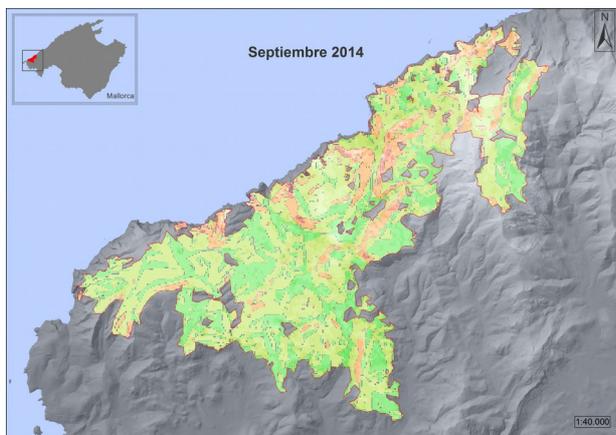
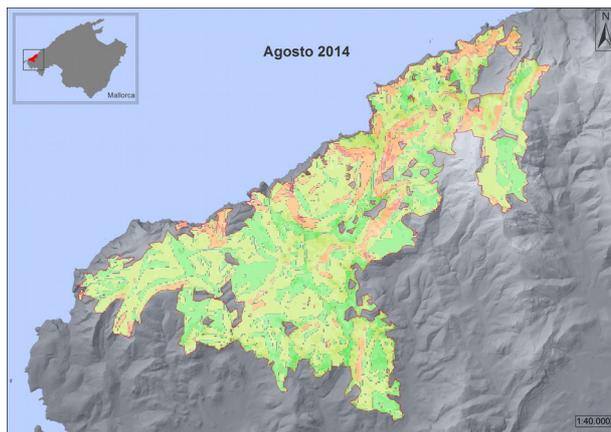
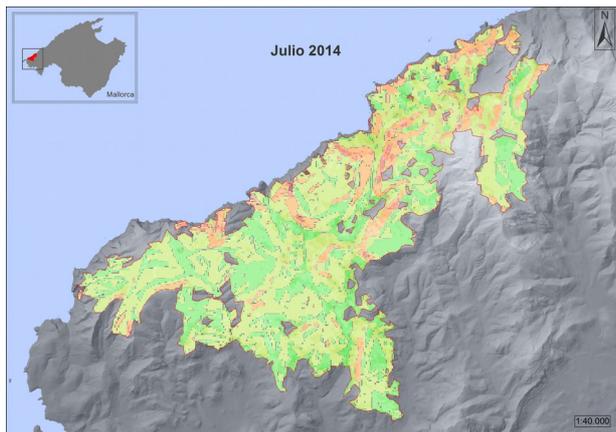
En las zonas entre 400 y 600 metros, la regeneración se sitúa por debajo de la media, aunque tiene una evolución muy pareja. El hecho de que estas zonas se sitúen por debajo de la media puede deberse a que tienen unas temperaturas con valores más extremos.

En las zonas entre 600 y 800 metros la vegetación también se encuentra por debajo de la media, aunque con valores ligeramente más elevados que en las zonas entre 400 y 600 metros. Esto puede deberse a que, aunque tengan unas temperaturas más extremas, también tienen una mayor cantidad de precipitación.

En las zonas superiores a 800 metros la evolución es bastante irregular. Mientras que en invierno y primavera los valores se sitúan por encima de la media, en verano se sitúan por debajo y en otoño experimentan un fuerte crecimiento. Por tanto, en otoño estas zonas pueden tener una mayor cantidad de precipitación, pero en la estación seca tienen una menor capacidad de retención de la humedad.

8.3.- Evolución del NDVI por pendientes





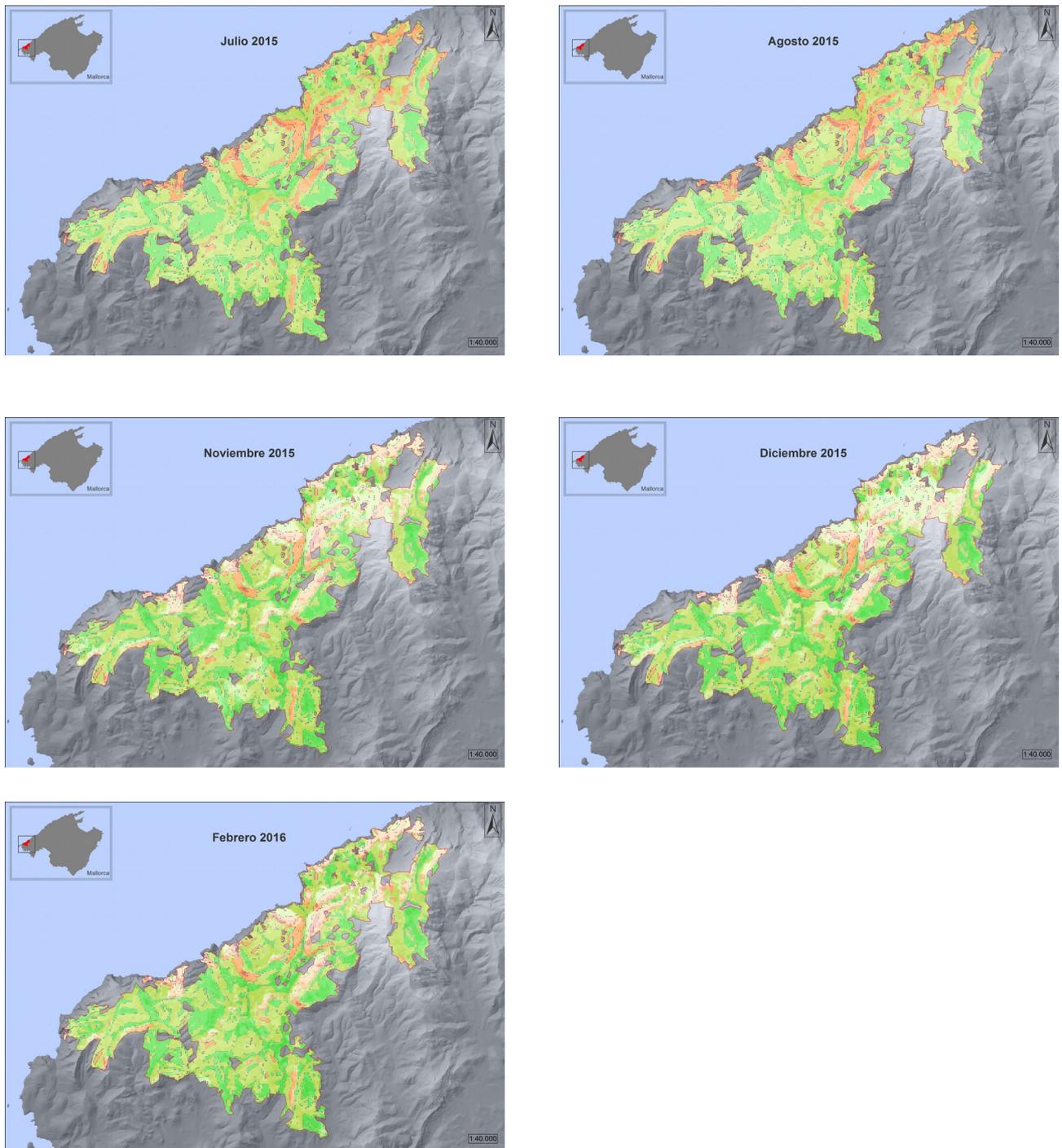


Figura 9. Mapas de evolución del NDVI por pendientes.

Evolución del NDVI por pendientes

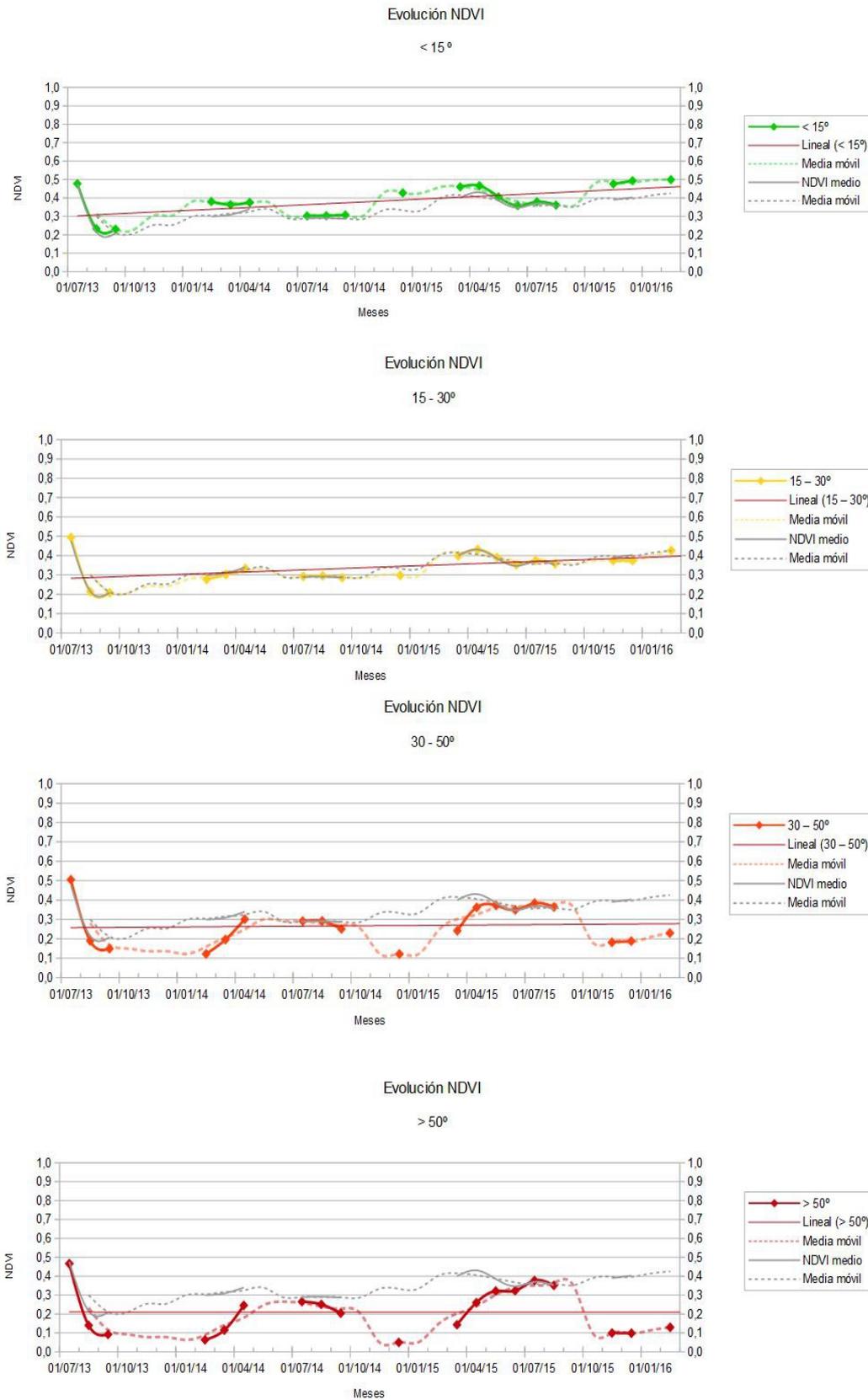
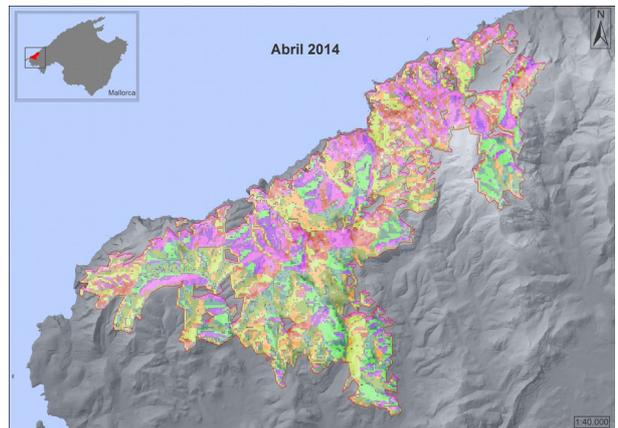
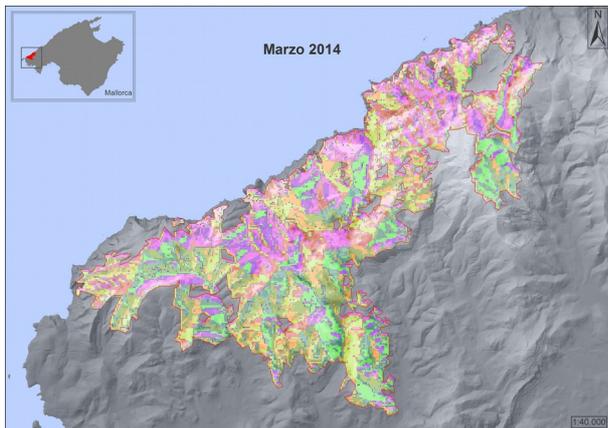
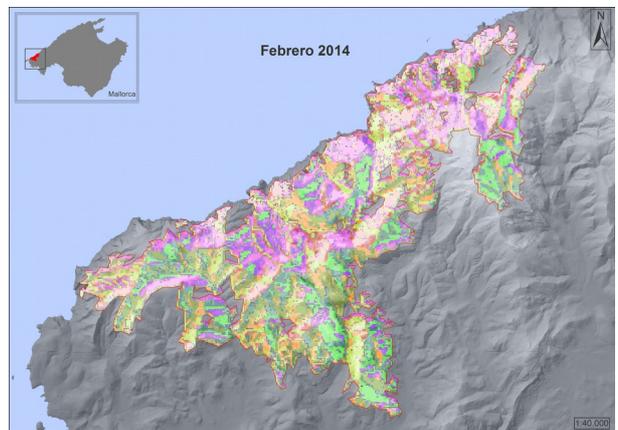
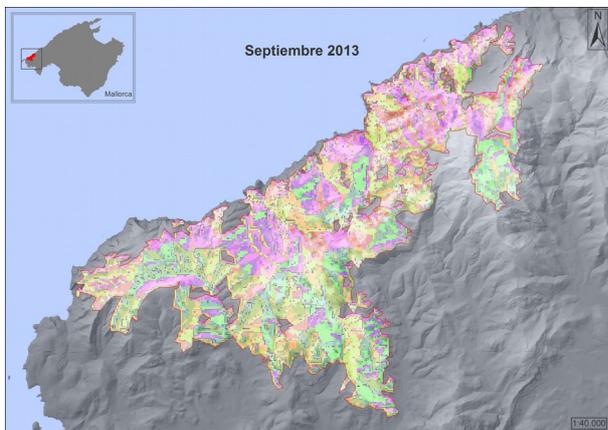
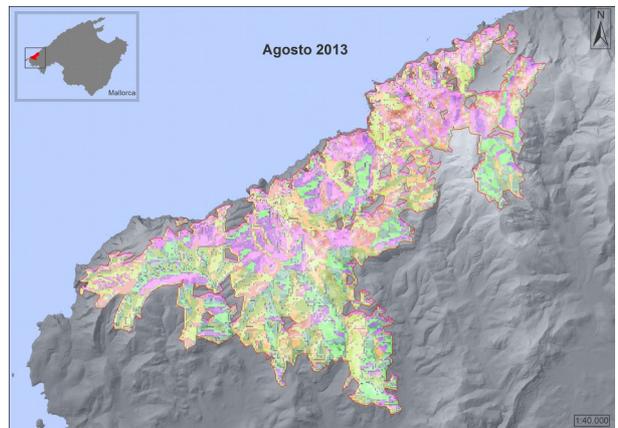
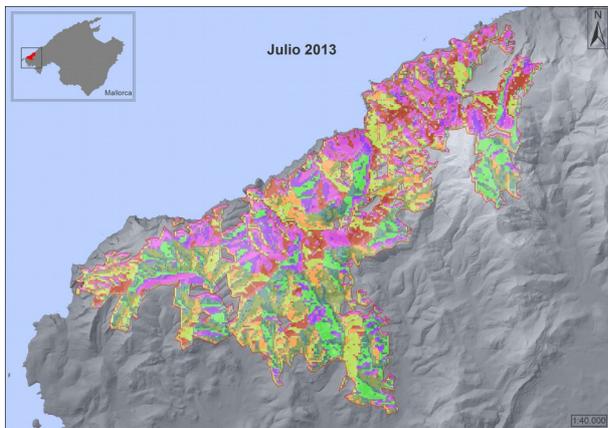
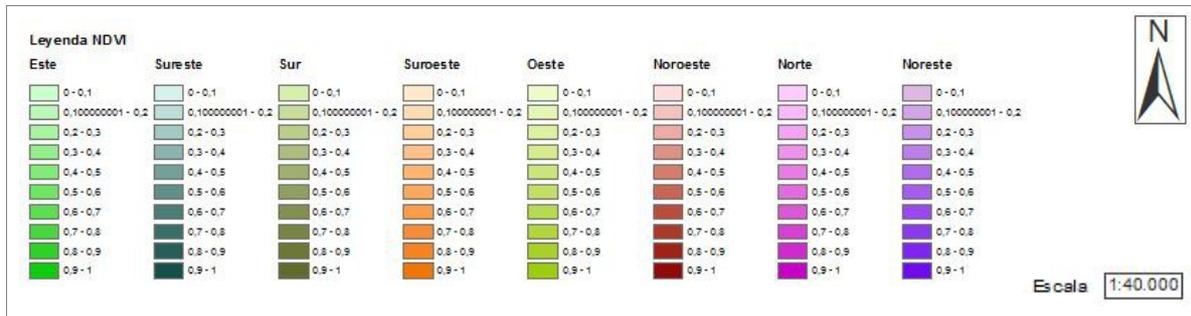
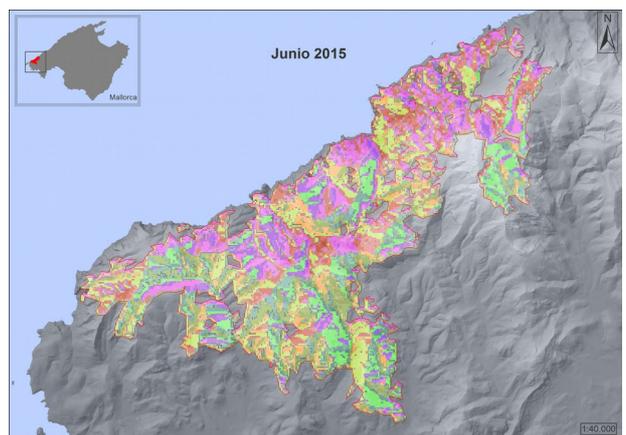
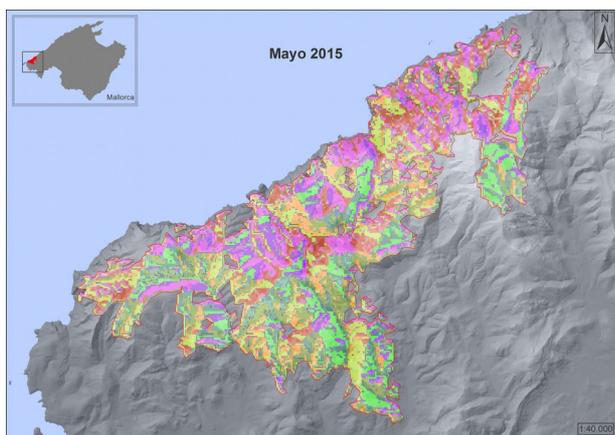
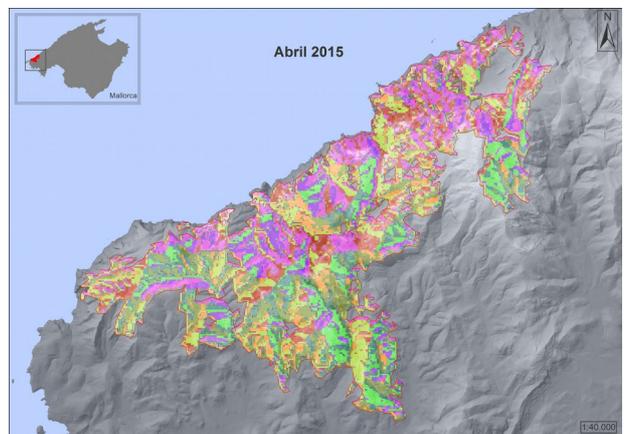
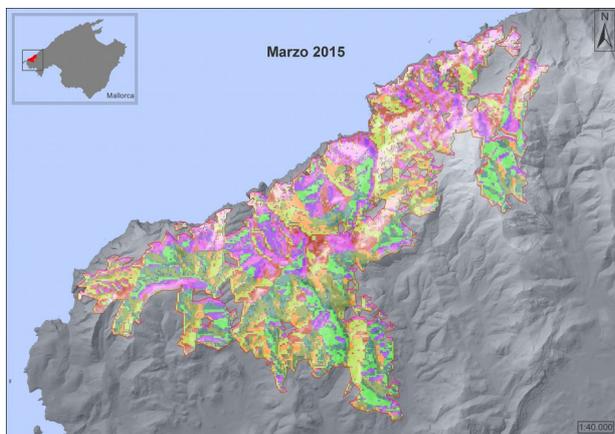
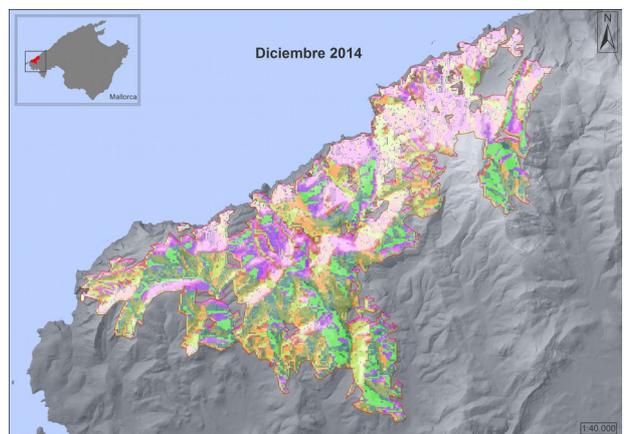
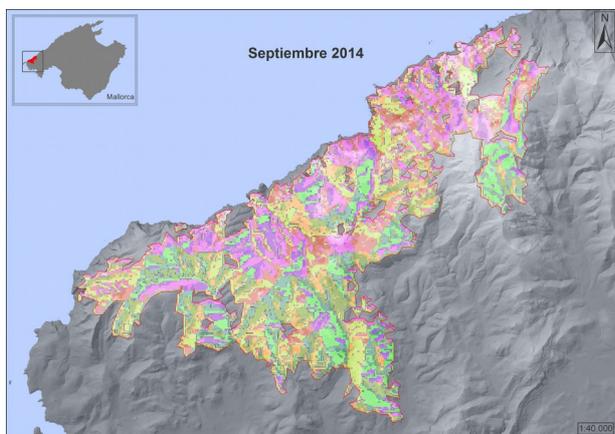
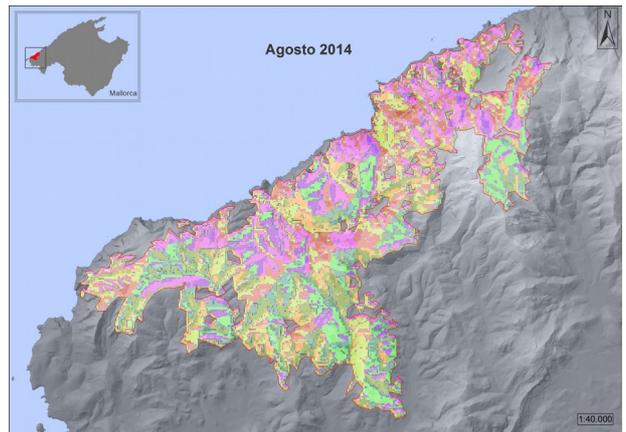
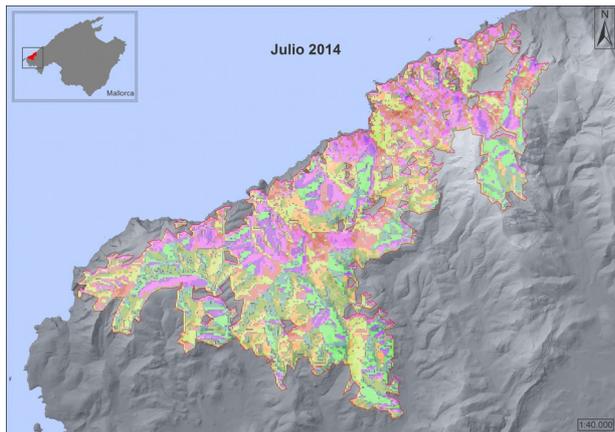


Figura 10. Gráficos de evolución del NDVI por pendientes.

* Por cuestiones de espacio, la discusión de la evolución por pendientes se encuentra a continuación de los gráficos por orientaciones (pg 29).

8.4.- Evolución del NDVI por orientaciones





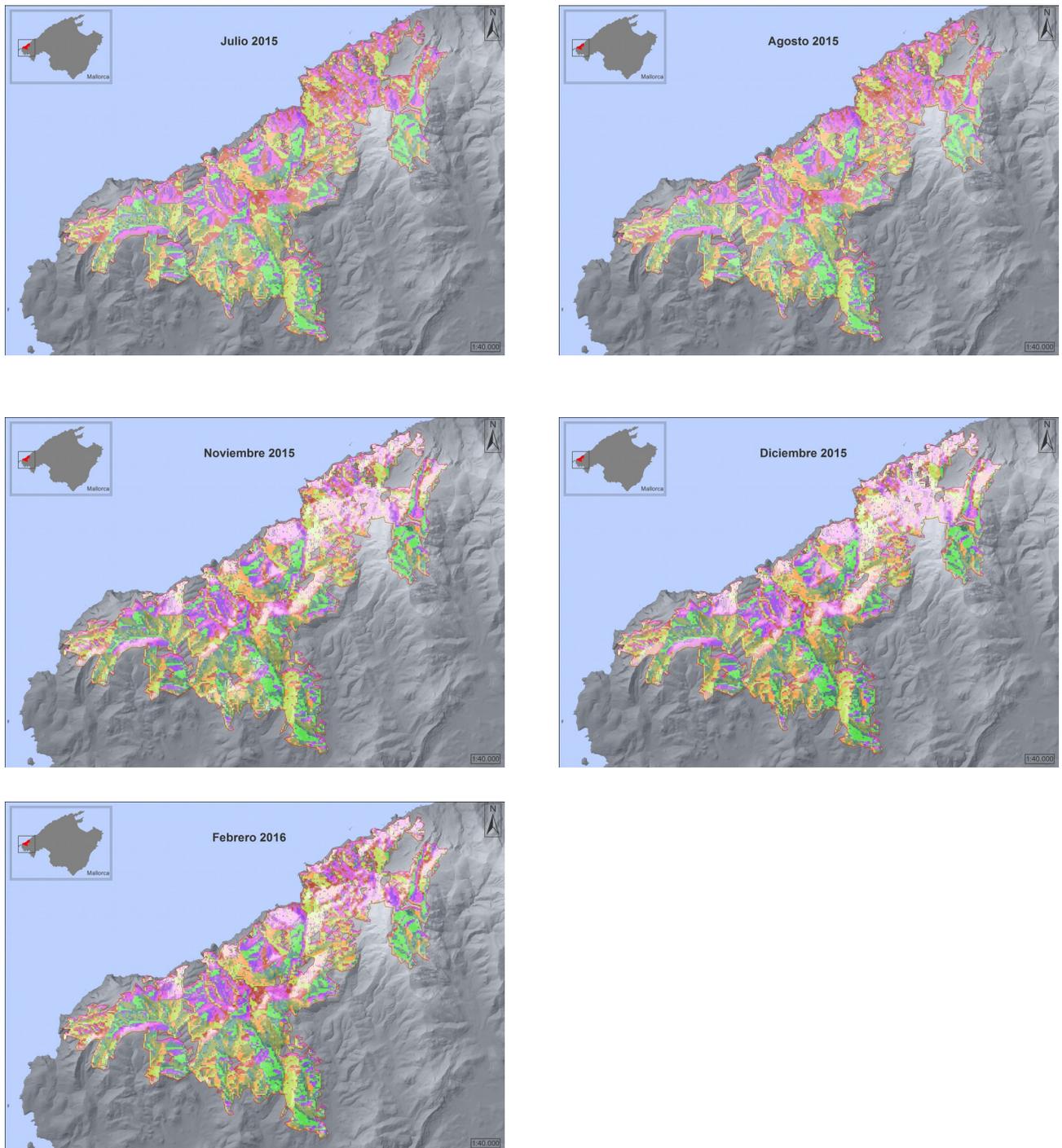
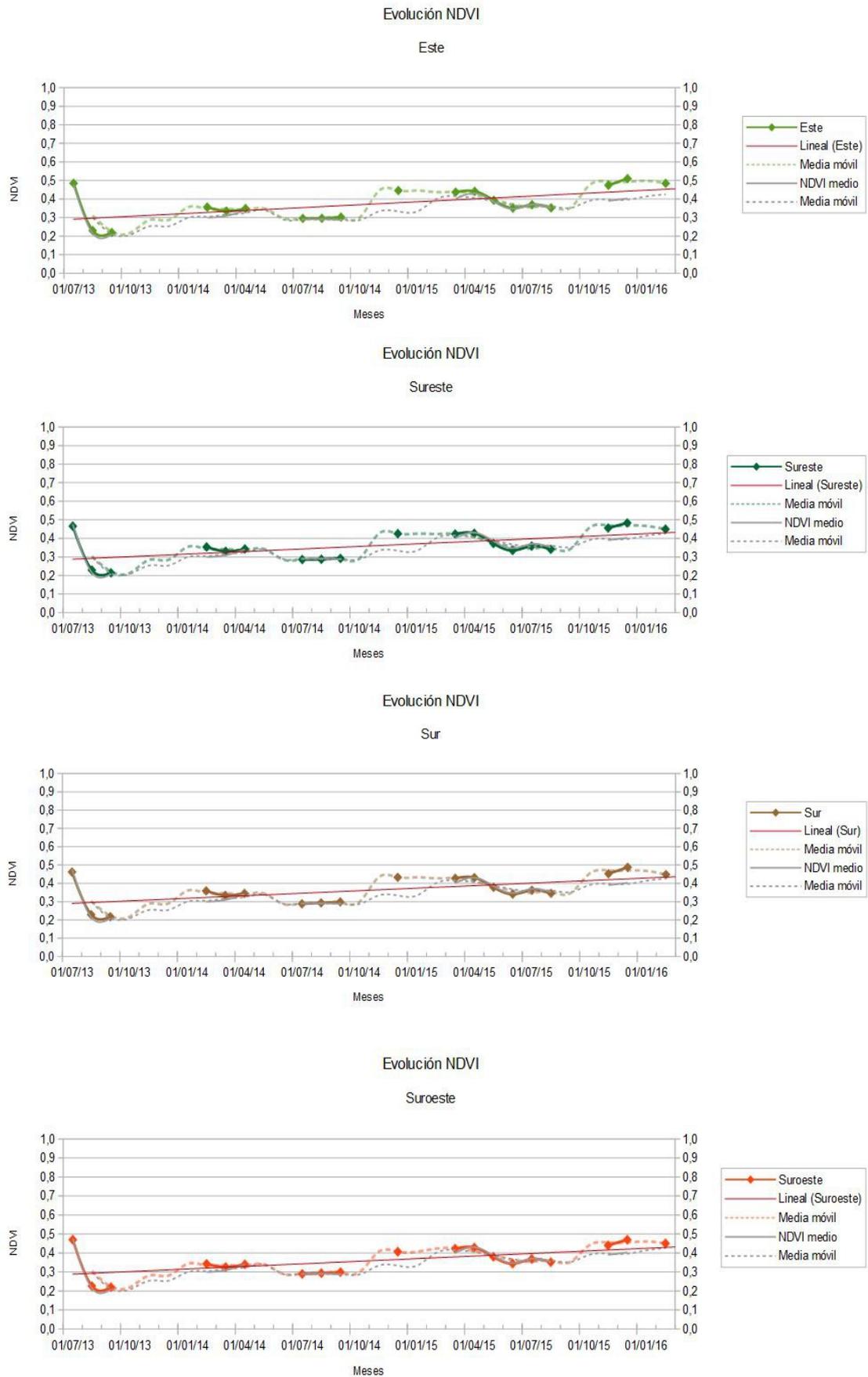


Figura 11. Mapas de evolución del NDVI por orientaciones.

Evolución del NDVI por orientaciones



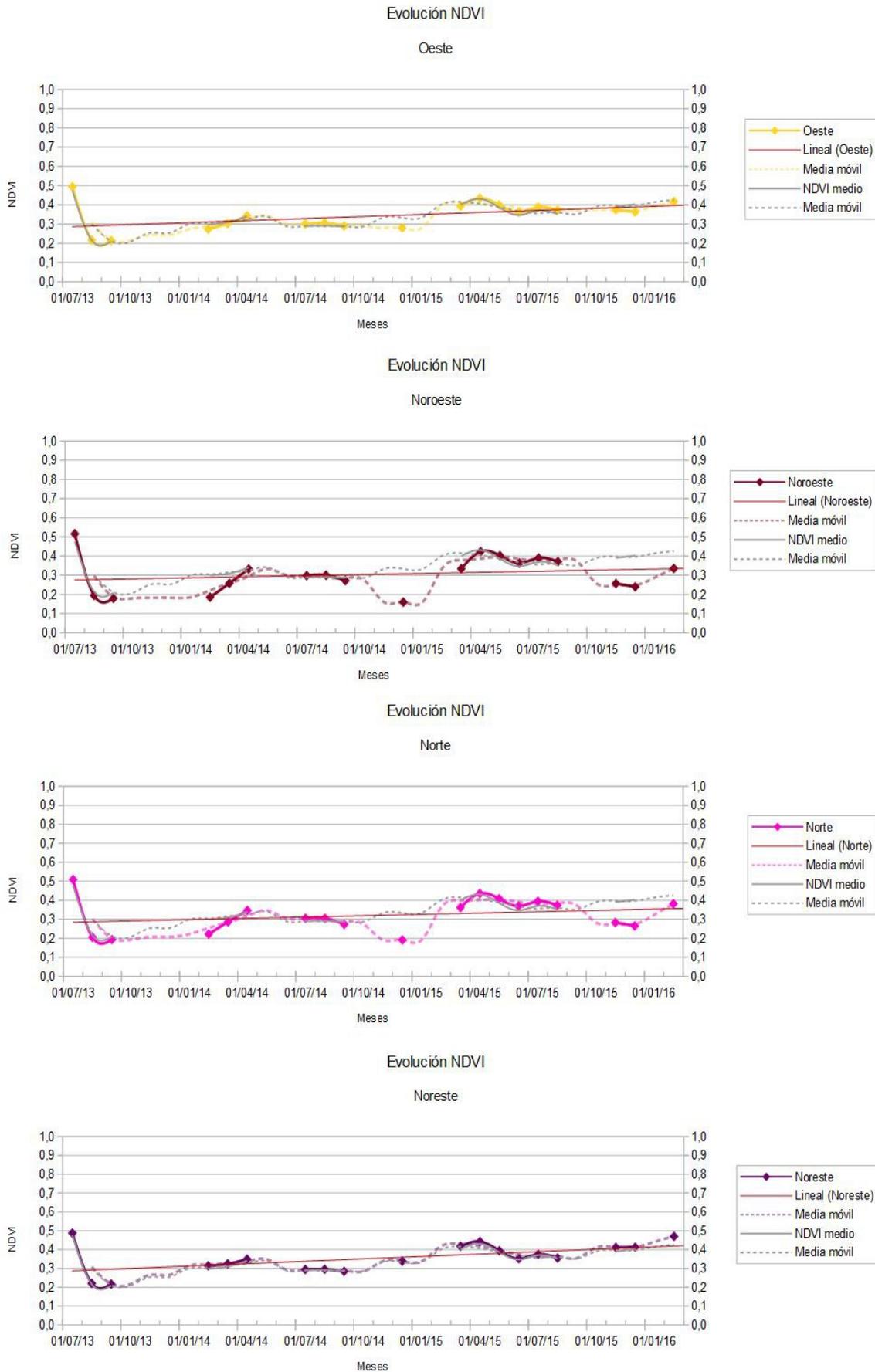


Figura 12. Gráficos de evolución del NDVI por orientaciones.

*** Evolución por pendientes**

Las áreas con pendiente menor a 15° se regeneran mejor que la media, sobre todo en invierno. Este hecho puede deberse a que, al tener una menor inclinación, estas zonas tienen más capacidad de retención del suelo y de la humedad, y en consecuencia, pueden tener un desarrollo más potente y albergar más cantidad de materia orgánica.

Las áreas con pendiente entre 15 y 30° ocupan un 52% de la superficie total del área de estudio, y por tanto se ajustan bastante a la media, aunque con unos valores ligeramente inferiores en los meses de invierno.

Las áreas con pendiente entre 30 y 50° tienen una regeneración muy irregular a lo largo del año. A partir de octubre sufren un fuerte descenso y se colocan con valores muy por debajo de la media, y a partir de febrero experimentan un fuerte ascenso situándose en valores próximos a la media. Estos descensos en otoño pueden deberse a que estas zonas inclinadas tienen una menor capacidad de retención de la precipitación.

La vegetación que se sitúa en pendientes mayores de 50° sigue un patrón de regeneración muy parecido al anterior, aunque con unos descensos más marcados y, por tanto, una mayor oscilación. De esta manera, se podría entender que cuanto más inclinada esté una zona, más dificultades tendrá para retener el suelo y la humedad.

Evolución por orientaciones

La vegetación orientada al este tiene una regeneración mayor que la media desde octubre hasta marzo. Este hecho puede deberse a que estas zonas reciben una mayor insolación durante el invierno que el resto.

La vegetación orientada al sureste y al sur también sigue el patrón anterior.

En la vegetación orientada al suroeste, también se ve el mismo patrón que en el este, el sureste y el sur, aunque con unos valores ligeramente inferiores y más cercanos a la media. Por tanto, se puede entender que estas zonas reciben una menor insolación que las anteriores.

En cuanto a la vegetación orientada al oeste, sigue un patrón muy parecido a la media, aunque con valores mínimamente inferiores en invierno.

La vegetación orientada al noroeste es la que peor se regenera. Sufre fuertes oscilaciones durante el año, alcanzando la media durante los meses de primavera y verano pero muy por debajo de ésta durante los meses de otoño e invierno. Este hecho puede deberse a la geomorfología estructural de la Serra de Tramuntana, ya que los cabalgamientos se encuentran dirigidos al noroeste. Por tanto, estas zonas tendrán una insolación inferior a las demás.

Un patrón muy parecido al anterior es el que sigue la vegetación orientada al norte, aunque con unos descensos más débiles en otoño y, por tanto, una menor oscilación. Esta menor oscilación puede deberse a las condiciones geomorfológicas señaladas anteriormente, ya que las zonas orientadas al norte tendrían una mayor insolación que las orientadas al noroeste.

La vegetación orientada al noreste sigue una evolución pareja a la media. En este caso no se puede atribuir esta semejanza a la superficie que esta clase ocupa, ya que solamente representa un 9% del área de estudio. Por tanto, este patrón también podría relacionarse con cuestiones geomorfológicas que condicionan la insolación.

8.5.- Evolución NDVI por recurrencia

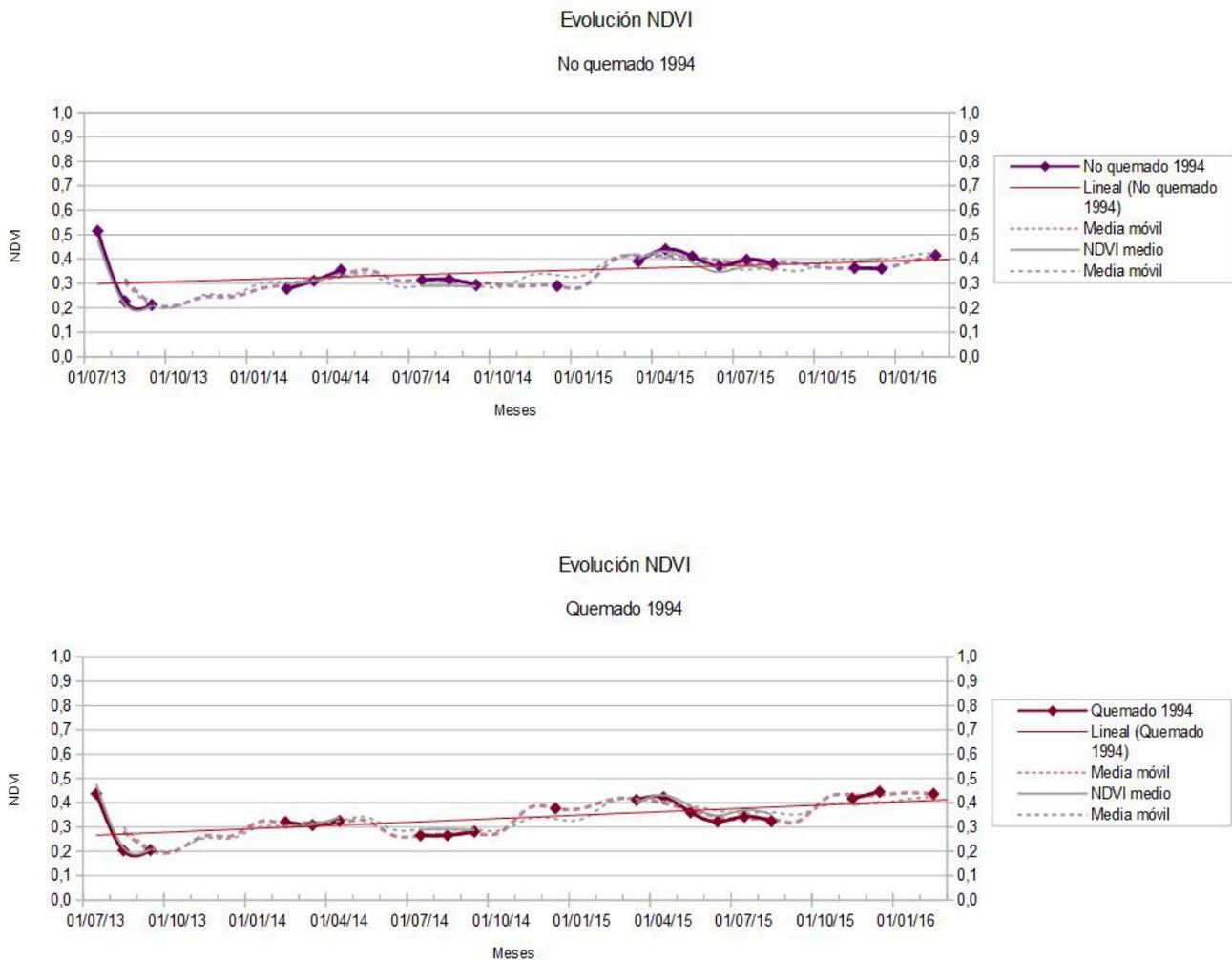


Figura 13. Gráficos de evolución del NDVI por recurrencia.

En las zonas que no se vieron afectadas por el incendio de 1994, los valores se sitúan ligeramente por encima de la media hasta finales de 2014. En cambio, a partir de 2015 los valores se sitúan ligeramente por debajo. Este hecho puede deberse a que las áreas que no se quemaron en 1994 tenían un NDVI más elevado en el momento del incendio de 2013 que las áreas quemadas en el incendio anterior y, por tanto, en un principio podrían haber tenido una recuperación más rápida.

En cambio, en las zonas que se quemaron en el incendio de 1994, los valores son ligeramente inferiores a la media hasta finales de 2014, y a partir de 2015 se sitúan ligeramente por encima. Esto significa que en un principio estas áreas se vieron más afectadas por las llamas, pero con el tiempo se van regenerando mejor que las áreas que no se quemaron en 1994. Por tanto, en esta área se podrían encontrar especies que se han adaptado mejor a los incendios forestales.

De todas formas, viendo la similitud entre ambos patrones, éste no es un factor muy determinante en la regeneración vegetal.

9.- Conclusiones

Según los resultados obtenidos, las áreas que mejor se regeneran son aquellas ocupadas por acebuche (a excepción de los cultivos, que dependen de la acción antrópica), situadas a menos de 200 metros de altura, con pendiente inferior a 15° y orientadas al este.

En cambio, las áreas que peor se regeneran son aquellas ocupadas por garriga, situadas a más de 800 metros de altura, con pendiente superior a 50° y orientadas al noroeste.

El factor "Recurrencia", que compara las áreas quemadas en el incendio de 1994 con las que no se quemaron, no ha ofrecido resultados significativos.

Mediante la elaboración cartográfica de la evolución del NDVI por factores, se pretendía observar si las diferencias espaciales en la regeneración vegetal se correspondían con alguno de esos factores en concreto. Los resultados demuestran que no hay ningún factor de los estudiados mediante el cual se puedan entender esas diferencias espaciales. Por tanto, hay un factor más que tiene una importante influencia en la distribución espacial de la regeneración: la variabilidad estacional climática. Como se puede apreciar en los mapas de evolución, durante los meses de verano los valores de NDVI son muy homogéneos, no hay diferencias notables entre las distintas zonas. En cambio, en otoño van apareciendo zonas donde el NDVI es mucho menor que en el resto, y estas diferencias se acentúan durante el invierno. Finalmente, en primavera los valores tienden a igualarse de nuevo. Este hecho se puede deber a la inclinación de los rayos solares, ya que es menor en los meses de invierno y, por tanto, hay más zonas de sombra y más zonas que reciben una menor insolación. En cambio, en verano los rayos son más perpendiculares, cubriendo una extensión mayor y distribuyendo la radiación de una forma más homogénea.

Por tanto, se ha comprobado que tanto la vegetación como los factores topográficos tienen incidencia en el comportamiento de la regeneración vegetal, aunque es mayor la influencia climática en términos de variabilidad espacial y temporal.

Después de un incendio, el factor antrópico puede contribuir a la regeneración vegetal de diversas formas. La más usada es la replantación, sobre todo de pinos en el caso de Baleares. Se trata de una acción muy recomendable, ya que un pinar tarda décadas en volver a su estado pre-incendio. Pero también hay que tener en cuenta otras posibles acciones, como por ejemplo las que puedan ayudar a minimizar la erosión en zonas elevadas y con fuertes pendientes. De esta manera, se potenciarían los suelos de estas áreas permitiendo una mayor actividad orgánica. Además, la gran mayoría de endemismos de Baleares se encuentra en las zonas altas de las montañas.

Como se ha visto anteriormente, la garriga es la formación vegetal que más sufre para regenerarse después de un incendio. Además, de las formaciones vegetales analizadas, es la que contiene más biodiversidad. Por tanto, después de un incendio forestal se deberían llevar a cabo acciones que puedan ayudar a la recuperación de estas formaciones.

10.- Agradecimientos

Realizar este trabajo no habría sido posible sin la ayuda y los conocimientos del Dr. Jorge Lorenzo Lacruz. Deseo expresar mi más sincero agradecimiento por todo lo que me ha enseñado, transmitido e inculcado, y también por su dedicación, implicación y, sobre todo, paciencia.

También me gustaría agradecer a mi familia, pareja, amigos, compañeros y conocidos su inestimable ayuda y apoyo.

11.- Referencias bibliográficas

- Bernabé Maestre, J. "Mapas de pendiente. Métodos y aplicación." *Cuadernos de Geografía*, nº 12. (1973): págs. 19-29. Web. [Consulta 12/04/2016]
<<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2296120.pdf>>
- Dorrego, X. y Álvarez, G. "Teledetección y SIG en la gestión de los incendios forestales en Galicia." *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible*. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección (2009): págs. 297-300. Web. [Consulta 12/04/2016]
<<http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal75.pdf>>
- Escuin, S., Navarro, R., y Fernández, P. "Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images". *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 29 (2008). Págs. 1053 – 1073. Web. [Consulta 12/04/2016] <http://www.mtbs.gov/pdf/Escuin_Navarro_etal_2008_BS_NBR_NDVI_Spain.pdf>
- García Martínez, E. y Pérez-Cabello, F. "Análisis de la regeneración vegetal mediante imágenes Landsat-8 y el producto MCD15A2 de MODIS: el caso del incendio de O Pindo (Galicia)." *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Universidad de Zaragoza - AGE (2015): págs. 621-630. Web. [Consulta 12/04/2016]
<http://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/065_Garcia%20Martinez.pdf>
- González Alonso, F. "Aplicaciones de la teledetección espacial al estudio de los incendios forestales. Detección de incendios en Galicia." *Congreso forestal español - Lourizán (1993). Ponencias y comunicaciones*. Tomo I.: págs. 53-57. Web. [Consulta 12/04/2016]
<<http://www.secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewFile/3148/3113>>
- Lee, S., Kim, C., Cho, H. "Monitoring of Forest Burnt Area using Multi-temporal Landsat TM and ETM+ Data." *Korean Journal of Remote Sensing*. Vol. 20 (2004): págs. 13-21. Web. [Consulta 12/04/2016]
<http://ocean.kisti.re.kr/download/volume/ksrs/OGCSBN/2004/v20n1/OGCSBN_2004_v20n1_13.pdf>
- Li, P., Jiang, L., Feng, Z. "Cross-Comparison of Vegetation Indices Derives From Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors." *Remote Sensing*. Vol. 6 (2014). págs. 310-329. Web.
<<http://www.mdpi.com/2072-4292/6/1/310/htm>> [Consulta 12/04/2016]
- Montorio Llovería, R., et al. "Estudio de los procesos de regeneración vegetal postincendio en parcelas experimentales mediante radiometría del campo." *Cuadernos de Investigación Geográfica. Universidad de La Rioja*. Nº 33. (2007): págs. 59-84. Web.
<<https://dialnet.unirioja.es/descarga/./2569794.pdf>> [Consulta 12/04/2016]
- Nieto Masot, A., García Paredes, C., y Fernández Sánchez, A. "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de Sevir, Modis y Landsat TM 5: Emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales." *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. GeoFocus (Artículos), nº 11(2011): págs. 375-408. Web.
<<http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/download/233/302>> [Consulta 12/04/2016]
- Oumar, Zakariyyaa. "Fire scar mapping for disaster response in KwaZulu-Natal South Africa using Landsat 8 imagery." *South African Journal of Geomatics*. Vol. 4. No. 3, 2015: págs. 309-316. Web.
<<http://www.sajg.org.za/index.php/sajg/article/view/275>> [Consulta 12/04/2016]

- Pardo Pascual, J. E., et al. "Influencia de la topografía en la regeneración vegetal de áreas quemadas" *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*. (2001): págs. 155-159. Web.[Consulta 12/04/2016] <<http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida32.pdf>>
- Potter, C. "Geographic Analysis of Burn Severity for the 2013 California Rim Fire." *Natural Resources*. Vol.5 (2014): págs 597-606. Web.[Consulta 12/04/2016] <http://file.scirp.org/Html/2-2000402_48894.htm>
- Romo Leon, J. R., van Leeuwen, W. and Casady, G. M. "Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments." *Remote Sensing*, 4 (2012): págs. 598-621. Web. [Consulta 12/04/2016] <<http://www.mdpi.com/2072-4292/4/3/598>>
- Vicente-Serrano, S., Pérez-Cabello, F., y Lasanta, T. "Pinus halepensis regeneration after a wildfire in a semiarid environment: assessment using multitemporal Landsat images." *CSIRO PUBLISHING - International Journal of Wildland Fire*. Nº 20 (2011): págs. 195-208. Web. [Consulta 12/04/2016] <<http://www.publish.csiro.au/paper/WF08203.htm>>
- White, J., Swint, P. "Fire effects in the northern Chihuahuan Desert derived from Landsat-5 Thematic Mapper spectral indices". *Journal of Applied Remote Sensing*. Vol.8 (2014). Web. [Consulta 12/04/2016] <<http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1846589>>