PLAN ESPECIAL DE INFRAESTRUCTURAS PEI-PFOT-262 REFERENTE A LA PSFV MAURICIO SOLAR Y LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA Y LÍNEAS ASOCIADAS.

VERSIÓN INICIAL DEL PLAN: DOCUMENTO PARA APROBACIÓN INICIAL

BLOQUE II. DOCUMENTACIÓN AMBIENTAL

ANEXO X. ANÁLISIS DEL RIESGO DE EROSIÓN

TÉRMINOS MUNICIPALES DE CHINCHÓN Y MORATA DE TAJUÑA.

COMUNIDAD DE MADRID

MAYO 2023

**Nota. El presente estudio contempla las infraestructuras incluidas en el Borrador del PEI, previas a la modificación realizada en las mismas tras la incorporación de las sugerencias del Documento de Alcance, del cumplimiento de los informes recibidos de las Administraciones públicas consultadas, principalmente la D.G. de Biodiversidad y Recursos Naturales de la Comunidad de Madrid, así como de la Declaración de Impacto Ambiental como parte de la tramitación ambiental llevada a cabo en el MITECO, y que fue publicada en el BOE con fecha 2 de febrero de 2023.*

De este modo, las conclusiones asociadas a la planta solar fotovoltaica Martianez Solar ya no resultan de aplicación al haberse suprimido ésta. Igualmente, las conclusiones relativas al tramo aéreo de la LEAT entre la ST Mauricio y el apoyo 18 ya no resultan de aplicación puesto que dicho tramo se plantea ahora en subterráneo.

La actualización de este estudio se llevará a cabo en siguientes fases de la tramitación.



Análisis del Riesgo de Erosión del PFOT_262. Mauricio Solar y Martiánez Solar

Contenido

1 INTRODUCCIÓN 3
1.1 ECUACIÓN RUSLE 4

2 OBJETIVOS 6

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 6

4 METODOLOGÍA 6
4.1 FASE I: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSLE EN GIS 6
4.1.1 Mapa topográfico 6
4.1.2 Mapa de altitud 7
4.1.3 Mapa de orientaciones 7
4.1.4 Mapa de pendientes 7
4.1.5 Factor R 8
4.1.6 Factor K 8
4.1.7 Factor LS 9
4.1.8 Factor C 9
4.1.9 Factor P 10
4.1.10 Mapa de Riesgo de erosión 10
4.2 FASE II: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSTE V 2.0 EN ZONAS IDENTIFICADAS CON RIESGO ALTO DE EROSIÓN 11
4.2.1 Generación de escenarios de erosión 11
4.2.2 Análisis de suelos en laboratorio. 12
4.2.3 Estructura del suelo 12
4.2.4 Análisis textural 14
4.2.5 pH del suelo 15
4.2.6 Conductividad eléctrica del suelo 16
4.2.7 Contenido en carbono orgánico en el suelo 17
4.2.8 Aplicación del *software* RUSLE VERSION 2.0. 18
4.2.9 Variable “Tipo de suelo” 20
4.2.10 Variable “Datos climáticos” 20
4.2.11 Variable “Topografía” 20
4.2.12 Variable “Cubierta vegetal” 20
4.2.13 Variable “Manejo del suelo” 21

5 RESULTADOS 21
5.1 FASE I: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSLE EN GIS 21
5.2 FASE II: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSLE V 2.0 EN ZONAS IDENTIFICADAS CON RIESGO ALTO DE EROSIÓN 29
5.2.1 Aplicación del modelo RUSLE al campo 29
5.2.2 Resultados obtenidos en laboratorio 30
5.2.3 Resultados obtenidos en el programa RUSLE v.2. 31

6 CONCLUSIONES 35

7 BIBLIOGRAFÍA 37

APÉNDICE CARTOGRÁFICO

- Mapa topográfico. Escala 1:25.000
- Mapa de altitud. Escala 1:25.000
- Mapa de orientaciones. Escala 1:25.000
- Mapa de pendientes. Escala 1:25.000
- Mapa geológico. Escala 1:25.000
- Mapa de vegetación y usos del suelo. Escala 1:25.000
- Mapa factor K. Escala 1:25.000
- Mapa factor LS. Escala 1:25.000
- Mapa factor C. Escala 1:25.000
- Mapa de Riesgo de Erosión. Escala 1:25.000

APÉNDICE FOTOGRÁFICO

1 INTRODUCCIÓN

El objeto de esta memoria es presentar de manera resumida los procedimientos de trabajos realizados para estimar el riesgo de erosión de los diferentes ámbitos de estudio y los resultados asociados a cada proyecto.

El suelo es un recurso natural no renovable a una escala temporal humana (Cermeño, 2017) necesario para mantener la vida en los ecosistemas terrestres que nos provee de numeroso bienes y servicios ecosistémicos. Si nos fijamos en esta definición del suelo, es innegable la necesidad de conservar y mantener un buen manejo de este recurso si se quiere evitar su degradación.

Tal y como se ha puesto de manifiesto la erosión es uno de los problemas más importantes vinculados a la degradación del suelo, sobre todo en áreas catalogadas como áridas o semiáridas (Casermeiro *et al.,* 2004). En general, la erosión es un proceso natural que consiste en la disgregación de la estructura del suelo y posterior trasporte de las partículas del suelo por acción del agua o el viento; en ocasiones este fenómeno natural se acelera por la acción humana y es necesario para su análisis una aproximación multifactorial.

Por otro lado, la alta demanda de energía por parte de la población mundial y la necesidad de disminuir las emisiones de carbono en todo el planeta favorecen la implantación de energías renovables en diferentes áreas del mundo (Armstrong, Ostle y Whitaker, 2016). Una de las soluciones más contempladas por todos los países es la implantación de grandes parques fotovoltaicos que permitan obtener energía a partir de la radiación solar, que minimiza la contaminación por gases de efecto invernadero. Debido a que la aplicación de grandes parques solares es un acto relativamente novedoso, no existen muchos estudios sobre los impactos que pueden provocar en el medio ambiente, especialmente los impactos que pueden generar sobre el suelo.

En el año 2020, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico definió los criterios para considerar que un proyecto cumplía todas las directrices relacionadas con el medio ambiente en los informes de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Dentro del informe redactado por dicha entidad (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020) se reconoce como impacto importante la erosión del suelo, debiéndose aplicar medidas preventivas y

correctoras que eviten o palien la pérdida de suelo en el área donde se produzca la obra civil.

Aunque existen diferentes métodos para identificar la pérdida de suelo en un área determinada, como la USLE, EUROSEM o WEPP, la metodología elegida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico es la Ecuación RUSLE.

1.1 Ecuación RUSLE

Aunque ha habido varias modificaciones de la Ecuación RUSLE, esta deriva, en primera instancia, de una revisión de la Ecuación USLE (Wischmeier y Smith, 1978) realizada por Renard et al. en el año 1997. La última versión de dicha ecuación se remonta al año 2008, titulada RUSLE versión 2 y fue desarrollada por el Servicio de Investigación Agrícola de Estados Unidos (Agricultural Research Service).

Todas las ecuaciones derivadas de la USLE se basan en la determinación de la pérdida de sedimento de un territorio mediante diversos factores relacionados con la erosión hídrica. Tanto la USLE como la RUSLE son las metodologías más utilizadas a nivel internacional. Tal es así, que el extinto Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) realizó en el año 1991 los Mapas de Estados Erosivos de España utilizando la metodología de la USLE, para, posteriormente, actualizarlos mediante la RUSLE.

A partir de este momento, toda la normativa y recomendaciones en materia de medio ambiente y conservación de suelos aplicada en el territorio español se basó en los cálculos realizados por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza mediante estas ecuaciones.

En la actualizad, la Ecuación RUSLE se sustenta mediante un software informático[1]. La pérdida de suelo calculada mediante la Ecuación RUSLE tiene carácter diario, pero se suele visualizar sumando todas las medidas hasta obtener un resultado anual. La medida se proporciona en t ha^{-1} $año^{-1}$ y los factores que intervienen en dicha metodología se desarrollan en este capítulo a partir de la Eq. 1:

[1] https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/docs/revised-universal-soil-loss-equation-rusle-welcome-to-rusle-1-and-rusle-2/

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Eq. 1. Ecuación RUSLE

Los factores que interviene en la Ecuación RUSLE se definen como:

- Factor A: representa la pérdida de suelo diaria. La suma de todas las pérdidas de suelo proporciona la pérdida de suelo anual. Como se comenta anteriormente, el resultado agregado más usual es el anual en toneladas de suelo que se pierde por unidad de superficie y tiempo t ha-1 año-1.
- Factor R: representa la erosividad de la precipitación. En la ecuación RUSLE, a diferencia de la USLE, se mide este factor de manera diaria. De esta forma, se observa que los periodos erosivos más intensos aumentan la pérdida de suelo diaria.
- Factor K: se traduce como la erodibilidad del suelo, es decir, la capacidad del suelo a ser erosionado o a la inversa la resistencia del suelo a ser erosionado por un factor externo.
- Factor LS: se traduce como el factor topográfico. Dentro del mismo, se encuentran dos tipos de componentes. El componente “L” que mide la longitud de la ladera, y el componente “S”, que se refiere a la inclinación de la pendiente.
- Factor C: referente a la cubierta vegetal que tiene el territorio. Este factor toma valores entre 0 y 1. Según la cubierta o manejo de la vegetación que se produzca en un área determinada, se incluirá un valor u otro.
- Factor P: se traduce como el factor de prácticas de conservación del suelo. Al igual que el factor C, el factor P sólo toma valores entre 0 y 1.

La combinación de los factores R, K y LS indican la mayor pérdida de sedimento que puede llegar a encontrarse en un territorio dado. Por el contrario, los factores C y P, pueden disminuir y/o, modificar el resultado final.

El Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico indica que la cifra en 10 t ha^{-1} $año^{-1}$, es la máxima pérdida de suelo para construir cualquier obra civil. En caso de que se supere esta medida, será indispensable aplicar medidas preventivas y correctoras y realizar con posterioridad nuevos cálculos con la ecuación RUSLE.

2 OBJETIVOS

El objetivo de esta memoria es explicar los materiales y métodos utilizados para realizar una correcta cartografía de los emplazamientos susceptibles a sufrir erosión hídrica derivada de la implantación de parques fotovoltaicos.

De esta manera, en primer lugar, se identificarán las zonas que padecen una erosión mayor de 10 t ha^{-1} $año^{-1}$ o una erosión mayor de 25 t ha^{-1} $año^{-1}$ aplicando la ecuación RUSLE en GIS, para de manera posterior en aquellas zonas identificadas con riesgo alto (perdida de suelo de 10 t ha^{-1} $año^{-1}$) aplicar un estudio detalladao usando el software RUSLE v.2.

Para la aplicación del RUSLE v.2 ha sido necesario numerosos trabajos previos que incluyen: análisis cartográfico, visita a los emplazamientos, toma de muestras y análisis de suelos, diseño y desarrollo de escenarios *ad ho*c en RUSLE y análisis de los resultados obtenidos.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Las plantas Mauricio Solar y Martiánez Solar, con número de PFot 262, se localiza en la Comunidad de Madrid, en el municipio de Chinchón. Las coordenadas UTM del punto central de las poligonales son las siguientes: X= 455398,2; Y = 4449904,7. Estas PFV se localizan al este del Camino de la Chinchona. En total, cuenta con una superficie de 289,43 hectáreas (ver Mapa Topográfico).

En general, el terreno se utiliza para cultivos de secano, cultivos leñosos olivares y viñedos con algunos afloramientos de matorral y de arbolado.

4 METODOLOGÍA

4.1 FASE I: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSLE EN GIS

Para obtener un mapa de pérdida de sedimento en t ha^{-1} $año^{-1}$ es necesario realizar diferentes cartografías con los factores que involucran a la ecuación. A continuación, se expone la metodología utilizada para cada factor de la Ecuación RUSLE.

4.1.1 Mapa topográfico

Para la creación de esta cartografía se ha utilizado como base del mapa las ortofotos incluidas en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de la zona.

Superponiéndolo al paisaje, se han creado curvas de nivel cada 10 metros adquiridas a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Instituto Geográfico Nacional a una escala de 1:25.000. Además, se incluye un buffer de 500 metros que envuelve a las parcelas.

4.1.2 Mapa de altitud

El mapa de altitud, logrado a partir de la reclasificación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), representa la cota máxima y mínima de altura que alcanza el terreno dentro de los solares seleccionados. La altura máxima es de 745 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.) y la altura mínima de 493 m. s. n. m.

4.1.3 Mapa de orientaciones

El mapa de orientaciones se ha realizado mediante una reclasificación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del área selecciona mediante la herramienta de ArcGIS "*Orientaciones*". Esta herramienta divide el terreno según la orientación de cada ladera, reclasificando las parcelas en:

- Llano
- Norte
- Noreste
- Este
- Sureste
- Sur
- Suroeste
- Oeste
- Noroeste

4.1.4 Mapa de pendientes

Uno de los factores más importantes para determinar el riesgo de erosión de un área determinada es la pendiente del terreno. Mediante la herramienta "*SLOPE*", de ArcGIS, aplicada sobre el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), se obtiene una reclasificación de las parcelas según la pendiente de la ladera.

Para una mejor interpretación de la cartografía, se han reclasificado estas pendientes con los siguientes criterios:

- Pendientes entre 0 – 5 %
- Pendientes entre 5 – 12 %
- Pendientes entre 12 – 15 %
- Pendientes mayores de un 15 %

4.1.5 Factor R

En la actualidad, la determinación del factor R puede llevarse a cabo mediante diferentes metodologías. Aun así, uno de los métodos más utilizados internacionalmente es el desarrollado por Wischmeier y Smith (1978). Esta metodología es utilizada directamente por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico mediante su portal web (GeoPortal).

Para determinar el factor R en las diferentes parcelas de estudio, se localiza el área de interés mediante sus coordenadas UTM en el GeoPortal y se visualiza la capa interactiva “Factor R”. En el caso de que los diferentes solares tengan distintos factores R, se realizará una media ponderada en todo el territorio para obtener un factor R único.

4.1.6 Factor K

Tal como se comentaba en el punto 1.1., el factor K depende directamente del tipo de suelo que se encuentre en la zona de estudio. La determinación de un valor u otro está íntimamente ligado con la estructura, textura y porosidad del suelo.

Para poder obtener el dato más exacto del factor K, se toma como información cartográfica de partida el Mapa Geológico de España (E:1:25000) en formato WMS. Al no poder obtenerse estos archivos en formato shape, será necesario digitalizar las capas manualmente a este formato para su posterior tratamiento. La conversión del Mapa Geológico a una cartografía que represente el factor K, se utilizarán los datos obtenidos en Gisbert, Ibáñez y Moreno (2012).

Se decidió utilizar el Mapa Geológico de España en vez de una cartografía edafológica actualizada debido a dos problemas relacionados con la cartografía edafológica:

- En primer lugar, hay que indicar la ausencia de cartografía edáfica en el caso de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.
- En segundo lugar y con el fin de asegurar la comparación de resultados, y dado que el nivel de detalle del mapa de asociaciones de suelos de la Comunidad de Madrid

no es el adecuado (E:1:200.000) se decidió usar la misma metodología en todos los emplazamientos.

4.1.7 Factor LS

Tal como se comentaba anteriormente, el factor LS se compone de dos tipos de medidas. Por una parte, el factor L (referente a la longitud de la ladera), y por otra el factor S (referente a la inclinación de la pendiente).

Para obtener la cartografía asociada al factor LS, es imprescindible partir del Modelo de Elevación del Terreno (MDE) a una escala de 1:25.000. Gracias al MDE, se obtienen las pendientes, altitudes y orientaciones de la zona de estudio, además del mapa topográfico.

Para poder obtener el factor LS se utilizó el procedimiento y las fórmulas propuestas por Oliveira *et al.* (2015) (Eq.1.).

$$Lij - in = \frac{[(Aij - in + D^2)^{m+1} - (Aij - in)^{m+1}]}{(D^{m+2}) * (xij^m) * (22{,}13)^m}$$

Eq. 2. Ecuación de Oliveira *et al.* (2015) para calcular el factor L

En el caso del factor S, se utilizará una fórmula u otra en función de la inclinación de la pendiente (mayor o menor de un 9%) (Eq.2; Eq.3.)

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03$$

Eq.3. Ecuación de Oliveira *et al.* (2015) para calcular el factor S cuando la pendiente es menor de 9%

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50$$

Eq.4. Ecuación de Oliveira *et al.* (2015) para calcular el factor S cuando la pendiente es mayor del 9%

Donde θ es la pendiente en grados.

4.1.8 Factor C

Para la obtención del factor C del emplazamiento, es necesario realizar una conversión de los datos de cubierta vegetal que incluye el Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España a una vegetación reconocida y medida por la ecuación USLE. Para ello, se han identificado aquellas cubiertas vegetales iguales o similares del Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España a las aparecidas en Wischmeier y Smith (1978), completando dicho proceso con los datos aportados por Gisbert, Ibáñez y Moreno (2012).

De esta forma, se produce una tabla de correlaciones entre la cubierta vegetal del Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España con el factor C calculado por Wischmeier y Smith (1978) y Gisbert, Ibáñez y Moreno (2012).

4.1.9 Factor P

Determinar el factor P en lugares donde no se tiene conocimiento del manejo del suelo actual es una tarea complicada. Aun así, existe diferente bibliografía con la que poder acercar este factor a un valor real.

Mediante la interpretación de Cermeño (2017) del factor P, se entiende que sólo se evalúa como factor P aquellas prácticas de manejo del suelo que tengan relación con el laboreo o su no uso. De esta forma, si el suelo carece de laboreo, el factor P será igual a 0.

Para correlacionar el factor P según el tipo de laboreo existente en un territorio, nos basaremos en la documentación aportada por González del Tánago (1991) sobre dicho factor.

4.1.10 Mapa de Riesgo de erosión

Para obtener una cartografía real de la pérdida de suelo en un territorio dado, es necesario realizar la ecuación RUSLE mediante la herramienta de ArcGis "*Raster Calculator*". Una vez obtenido el mapa, se reclasifica según la pérdida de suelo:

- De 0 a 10 t ha^{-1} $año^{-1}$.
- De 10 a 25 t ha^{-1} $año^{-1}$.
- Mayor de 25 t ha^{-1} $año^{-1}$.

El material utilizado ha sido el siguiente:

- Programa informático ArcGis (Versión 10.3)
- Portal web del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (GeoPortal).
- Mapa geológico de España (Instituto geológico y Minero de España, IGME). Escala 1:50.000.
- Mapa forestal de España. Escala 1:50.000.
- Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España (2000-2009). Escala 1:50.000.
- Modelo Digital del Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional. Escala 1:25.000.

4.2 FASE II: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSTE V 2.0 EN ZONAS IDENTIFICADAS CON RIESGO ALTO DE EROSIÓN

4.2.1 Generación de escenarios de erosión

Gracias a la cartografía generada durante los meses de julio, agosto y septiembre del año 2021 del emplazamiento seleccionado para la instalación de parques solares, se realizó un análisis de la erosión hídrica potencial.

De esta manera, se identificaron aquellos lugares con pérdidas de suelo mayores a 10 t ha^{-1} $año^{-1}$ y con pendientes comprendida entre 0 y 15%. Esta clasificación se propuso debido a dos justificaciones distintas. La primera se debe a que los territorios con menos pérdidas de suelo no requieren un tratamiento adicional ni medidas correctoras. Por otro lado, que la instalación de parques fotovoltaicos no puede llevarse a cabo en lugares con una pendiente mayor al 15%, debido a limitaciones técnicas, por lo que estas zonas fueron eliminadas del análisis territorial.

Con los datos obtenidos, se agruparon los territorios basándose en la tipología de vegetación, el tipo de suelo y porcentaje de pendiente y se clasificaron según un código único de identificación que recogía la diversidad territorial.

Una vez codificadas las variables “tipo de vegetación”, “tipo de suelo” y “pendiente”, se procedió a integrar estas tres variables dando diferentes escenarios posibles donde sería necesario aplicar las diferentes medidas preventivas y correctoras definidas en el primer informe. El conjunto de escenarios creados se realizó mediante el software ArcGis, utilizando la herramienta “Raster Calculator”. La agrupación homogénea de estas áreas fue posible gracias a que todas las zonas de estudio se encontraban en un espacio con un clima relativamente semejante, por lo que el parámetro R de la ecuación RUSLE no variaba excesivamente.

El modelo raster obtenido de la agregación de las tres variables dio como resultado una serie de escenarios diferentes con distintas superficies medidas en píxeles. Cada píxel corresponde con 625 m^2 de terreno, por lo que, para calcular la superficie real de los escenarios, era necesario multiplicar el número de píxeles que ocupaba un escenario por su superficie en metros cuadrados. Por último, se transformaron los metros cuadrados a hectáreas, ya que es con la medida aconsejada en el análisis de la erosión y que se trabajará en los siguientes pasos. De los escenarios identificados se eligieron aquellos que son más representativos por su representatividad territorial.

4.2.2 Análisis de suelos en laboratorio.

Las propiedades químicas y físicas que caracterizan un suelo confieren a estos diferentes grados de protección frente a la erosión hídrica. El estudio, por tanto, de las cualidades del suelo, es importante para determinar la capacidad de un suelo a ser erosionado por el agua. Esta propiedad del suelo es conocida como erodibilidad y permite identificar a los suelos más sensibles, así como el establecimiento de las medidas protectoras y correctoras más adecuadas para cada situación.

En general, la propiedad más importante en este tipo de proceso es la estructura, que deriva de la textura y la materia orgánica, que condiciona las propiedades físicas del suelo y por tanto las tasas de infiltración y erosión claves en la erosión del suelo. De manera paralela, se procedió a analizar el pH y la conductividad eléctrica del suelo con el fin de buscar patrones significativos derivados de los factores formadores de los suelos.

Para poder determinar la erosionabilidad con la mayor precisión posible en cada una de las zonas del terreno, se procedió a analizar en el laboratorio las muestras recogidas de los diferentes emplazamientos seleccionados. El muestreo se llevó a cabo en las visitas a campo efectuadas en durante los meses de julio, agosto y septiembre del año 2021.

Las muestras recogidas son las representativas de la geología y edafología existente en las zonas de estudio. En total, se recogieron 2 muestras de suelo para este emplazamiento. Las distintas metodologías utilizadas para determinar las propiedades del suelo se desarrollan a continuación.

4.2.3 Estructura del suelo

La estructura del suelo es la piedra angular del comportamiento del suelo frente a la erosión y es el resultado de la integración de los componentes del suelo y de la historia de uso del mismo. En líneas generales suelos bien estructurados suelen tener un alto contenido en materia orgánica y en arcilla, presentan una alta porosidad eficaz y por tanto favorecen la infiltración y limitan la escorrentía por lo que son menos susceptibles a la erosión.

Se analizó la estructura del suelo según lo propuesto en la “Guía para la descripción de suelos” realizada en 2009 por la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO, 2009), la estructura del suelo se determina midiendo los siguientes valores:

Clasificación de la estructura de suelos agregados: diferenciando entre débil (no se observan agregados a simple vista o la agregación que existe entre las partículas es especialmente débil), moderado (los agregados son observables a simple vista y si realiza presión sobre el agregado provoca la rotura de éstos en agregados más pequeños) y fuerte (los agregados se observan muy fácilmente y son difíciles de romper).

Clasificación de tipos de estructura del suelo: se diferencian entre blocosa (en bloques), granular, laminar, prismática, estructura rocosa, forma de cuña y migajas, conglomerados y terrones (Figura 1).

Clasificación de las clases de tamaño para los tipos de estructura del suelo: diferenciando entre muy fino/delgado, fino/delgado, medio, grueso/espeso o muy grueso/espeso (Figura 2).

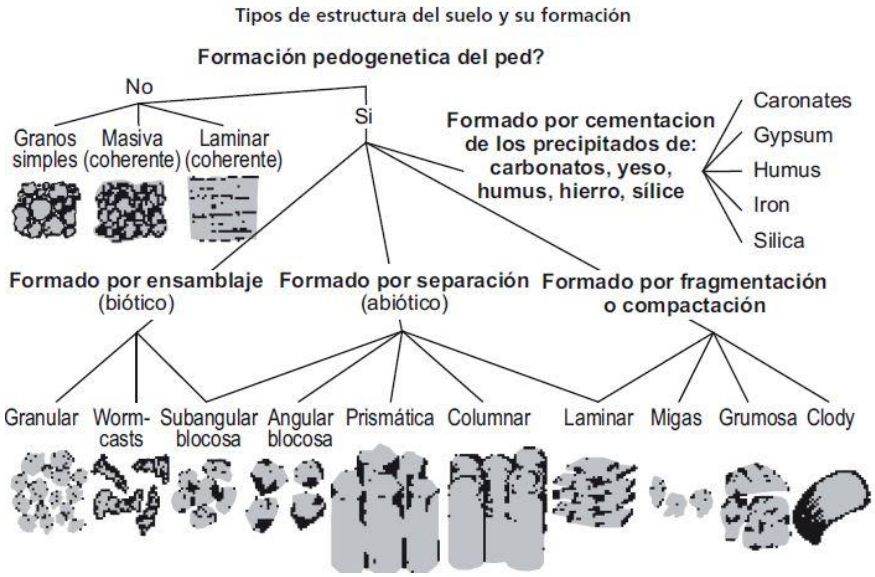


Figura 1. Clasificación de los tipos de estructura del suelo según la FAO. Fuente: FAO, 2009

Clases de tamaño para los tipos de estructura del suelo

		Granular/laminar	Prismática/columnar/ forma de cuña	Blocosa/terrones/ desmenuzable/grumos
		(mm)	(mm)	(mm)
VF	Muy fino/delgado	< 1	< 10	< 5
FI	Fino/delgado	1–2	10–20	5–10
ME	Medio	2–5	20–50	10–20
CO	Grueso/espeso	5–10	50–100	20–50
VC	Muy grueso/espeso	> 10	100–500	> 50
EC	Extremadamente grueso	–	> 500	–

Figura 2. Clasificación de las clases de tamaño para los tipos de estructura del suelo según la FAO.

Para determinar la estructura del conjunto de muestras recogidas, se procedió a realizar un secado al aire de éstas durante 24 horas. La desecación de las muestras se llevó a cabo mediante la extensión del suelo sobre un papel de filtro, material capaz de absorber la humedad. En la gran mayoría de los casos de estudio, las muestras se encontraban ya secas. Esto es debido a que las salidas de campo se realizaron en los meses de julio y agosto, periodo donde los suelos estaban secos. Una vez finalizado el secado preliminar, se procedió a examinar las muestras y clasificarlas según el procedimiento desarrollado en las Figuras 1 y 2.

4.2.4 Análisis textural

Para analizar la composición granulométrica de las muestras recogidas, se utilizó el método de la pipeta (Van Reeuwijk, 2002), en la fracción mineral del suelo. Previamente al análisis se procedió a los siguientes pretratamientos.

- Tamización para la obtención de tierra fina: Como paso preliminar al análisis químico de las muestras, se dividió el suelo entre componentes mayores de 2 mm y agregados más pequeños. Para ello, se utilizó un tamiz de 2 mm de apertura de malla. Una vez realizada la tamización, se introdujo el material menor de 2 mm en botes de plástico y el material de mayor dimensión en bolsas. Sólo se analizaron en el laboratorio la tierra fina del suelo (menor de 2 mm).
- Oxidación de la materia orgánica: Antes de realizar este método, es necesario eliminar de la muestra de suelo cualquier resto de materia orgánica que pueda albergar. Para ello, es necesario pesar 30 gr de muestra en un vaso de precipitado de 500 ml y añadir agua oxigenada (H_2O_2) al 20% hasta que la muestra se empape de este reactivo, mediante agitación suave.

Se sabe que una muestra contiene materia orgánica debido a la reacción que se forma una vez introducido el H_2O_2. La reacción llevada a cabo en este momento viene determinada por

una enzima oxidoreductora (catalasa) que se encuentra en la materia orgánica del suelo. Ésta, oxida el agua oxigenada y lo convierte en H_2O y O_2 Eq [5])

$$2\ H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2 \text{ [Eq.5]}$$

Eq. 5. Reacción entre el agua oxigenada y la materia orgánica mediada por las catalasas

La reacción es más rápida si se le adiciona calor a la muestra. Por este motivo los vasos de precipitado deben colocarse en un baño termorregulado para que los resultados se obtengan más rápidamente. Este procedimiento puede llegar a tardar una semana por cada muestra. Una vez se haya eliminado la materia orgánica y las muestras de estudio se hayan secado, es necesario retirarlas del vaso de precipitado realizando un raspado exhaustivo.

A continuación, se pesan 10 gr de suelo sin materia orgánica y se introduce en una probeta de 1 litro. Se añaden 20 ml de reactivo dispersante (40 gr de sodio polifosfato y 10 gr de Na_2CO_3 por cada litro de agua) junto con 500 ml de agua destilada. Esta mezcla debe ser agitada de manera continua durante 6 horas.

Para obtener el porcentaje de partículas de diferente tamaño, se procede de la siguiente manera:

- Extracción de arena gruesas mediante tamizado.
- Extracción de arena fina mediante sedimentación.
- Extracción de fracciones limo + arcilla a los 4’48’’
- Extracción de fracción arcilla a las 8 horas.

Para obtener los porcentajes de arenas, limos y arcillas correspondientes, se deberán realizar los siguientes cálculos:

- % de Arena = Peso en gr de Arena x 10
- % de Limo = (Peso en gr Limo) x 50 – 0,873) x 10
- % de Arcilla = (Peso en gr Arcilla) x 50 – 0,873) x 10

La suma de estos porcentajes debe encontrarse entre un valor de 95 y 101.

4.2.5 pH del suelo

El pH es una propiedad química que mide la acidez o alcalinidad del suelo. Esta característica es importante para entender la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, así como los procesos que ocurren en este medio (FAO, 2009). En nuestro caso el objetivo es clasificar los suelos en función de sus valores de pH que derivan del material original.

Para determinar el pH de las muestras recogidas, se utilizó el método desarrollado en Van Reeuwijk en 2002. Este procedimiento se compone de los siguientes pasos:

1. Pesar 20 gr de muestra de suelo ya tamizada en un Erlenmeyer de 400 ml y añadirle 50 ml de agua destilada.

2. Introducir el Erlenmeyer en un agitador durante 2 horas.

3. Medida directa del pH en la suspensión con un pH-metro digital previamente verificado.

4.2.6 Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica del suelo es la capacidad que tiene este medio para transportar corriente eléctrica. Los métodos desarrollados en el laboratorio para medir la salinidad, o conductividad eléctrica, se basan en analizar las sales disueltas que contiene una muestra de suelo saturada de agua (expresado en mS/cm) (Porta et al., 1999), es decir, la cantidad de cationes y aniones presentes en el suelo (Van Reeuwijk, 2002).

Así pues, la naturaleza química de las sales también condiciona las propiedades del suelo. En general, los suelos desarrollados sobre materiales yesíferos contienen una mayor conductividad eléctrica que otro tipo de compuesto (Van Reeuwijk, 2002).

Para la determinación en el laboratorio de la conductividad eléctrica de las muestras se utilizó el método desarrollado por Van Reeuwijk en 2002. A continuación, se resume este procedimiento:

1. La relación entre muestra de suelo y agua destilada es de 1:5, por lo que se deben pesar 10 gr de muestra para 50 ml de agua destilada. Esta composición se introduce en un Erlenmeyer de 400 ml.

2. Introducir el Erlenmeyer en un agitador durante 2 horas.

3. Sacar la muestra del agitador y dejar 2 horas en reposo.

4. Medir el tubo de ensayo con la muestra dentro con un conductivímetro digital previamente calibrado.

4.2.7 Contenido en carbono orgánico en el suelo

El contenido en carbono del suelo es una de las variables necesarias para poder utilizar la RUSLE, además junto con la arcilla forma parte de los agregados del suelo en el suelo lo que condiciona la porosidad eficaz y por tanto la relación infiltración/escorrentía.

La medición de la materia orgánica se llevó a cabo mediante el método de oxidación por vía húmeda (método de Walkley-Black) (Van Reeuwijk, 2002). Se trata de una volumetría por retroceso, que valora el exceso de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) que no ha sido reducido por una solución añadida, en este caso Sal de Mohr.

De manera resumida el método comprende los siguientes pasos:

Pesar en una balanza de precisión 0,5 gramos de la muestra finamente pulverizada y añadir a un vaso de precipitado de volumen igual a 400 ml. Apuntar el pesaje exacto. Repetir este proceso dos veces para cada muestra.

1. Añadir con una bureta 10 ml de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) 1N. Agitar suavemente para que todo el suelo se empape.

2. Añadir 20 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Agitar suavemente durante 20 segundos y dejar reposar durante 30 minutos.

3. Añadir 200 ml de agua destilada. Dejar enfriar a temperatura ambiente.

4. Repetir este proceso en tres vasos de precipitados vacíos. Estos tres vasos serán los blancos.

5. Realizar una valoración potenciométrica del exceso de dicromato no reducido mediante una solución de Sal de Mohr ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) 0,5N.

Con los ml de Sal de Mohr utilizados para reducir la muestra, se realizan los siguientes cálculos:

- Para obtener el porcentaje de carbono orgánico [Eq. 6]:

$$\% \text{ de carbono orgánico} = [1- (M/B)]*(3,9/P) \quad \text{[Eq. 6.]}$$

[Eq. 6.] Donde: M = ml de Sal de Mohr gastados en la valoración de la muestra. B = ml de Sal de Mohr gastados en la valoración del blanco. P = gramos de la muestra.

- Para obtener el porcentaje de materia orgánica [Eq. 7]:

$$\% \text{ de materia orgánica} = \% \text{ de carbono orgánico} * 1{,}72$$

[Eq. 7] El número 1,72 proviene de la división de 100/58 (estimando que la materia orgánica está compuesta por un 58% por carbono orgánico).

4.2.8 Aplicación del *software* RUSLE VERSION 2.0.

Para la estimación de erosión de suelos se utiliza la ecuación Universal y Revisada de Erosión de suelos conocida como RUSLE por dos razones: recomendación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD, 2020) y a que es uno de los software más actuales y que contiene mejoras en referencia a la vegetación y prácticas de manejo del suelo.

El programa RUSLE v.2. fue creado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) en el año 2016. Este software contiene dos componentes importantes. Por una parte, se encuentra el propio programa informático que se encarga de calcular diferentes algoritmos de cálculo que utiliza el método RUSLE. Por otro lado, se encuentran las bases de datos, que pueden venir definidas por el propio programa o bien ser modificadas (United Stations Department of Agriculture [USDA], 2016).

En el siguiente informe se utilizará la versión RUSLE v.2. (2.0.4.0.). Esta versión es la recomendada por la USDA para modificar, de forma más fácil, las diferentes bases de datos del programa. Puede descargarse en el siguiente enlace web: https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/research/rusle2/revised-universal-soil-loss-equation-2-download-rusle2/

Para conseguir una modificación completa de las bases de datos, es necesario estar en el modo R2_ARS_Science (nivel de acceso del programa). La plantilla utilizada debe ser ARS_Science y utilizar la base de datos Moses_2016.

Una vez el programa se encuentre descargado y la base de datos elegida, es necesario definir los valores representativos de la zona de estudio. Los parámetros que deben modificarse en el programa informático RUSLE v.2. para obtener la pérdida de suelo de los escenarios son el clima, suelo, topografía, cobertura vegetal y manejo del suelo.

La definición de escenarios de estudio viene determinada por la situación real del análisis cartográfico realizado en este emplazamiento. Cada escenario seleccionado contará con un clima, un tipo de suelo, una longitud de ladera, una pendiente determinada y el tipo de vegetación actual. Posteriormente, se define nuevos supuestos de evaluación intentando modelizar el diagrama de flujo del proyecto de instalación de planta fotovoltaica; concretamente se definen los siguientes supuestos. (Figura 3)

1. Situación actual o preoperacional.

2. Suelo desnudo, sin cubierta vegetal, suponiendo el peor de los casos posibles una vez concluida la fase de construcción de la instalación, Sobre este supuesto se plantean dos modificaciones con y sin mulch, al ser esta medida preventiva y correctora de medida muy sencilla de manejar.

3. Situación con el establecimiento de vegetación herbácea anual, etapa primo-colonizadora del suelo en el primer año.

4. Situación con el establecimiento de una cubierta vegetal de especies vivaces en transición hacia pastizales de tomillares que es la situación paraclimática.

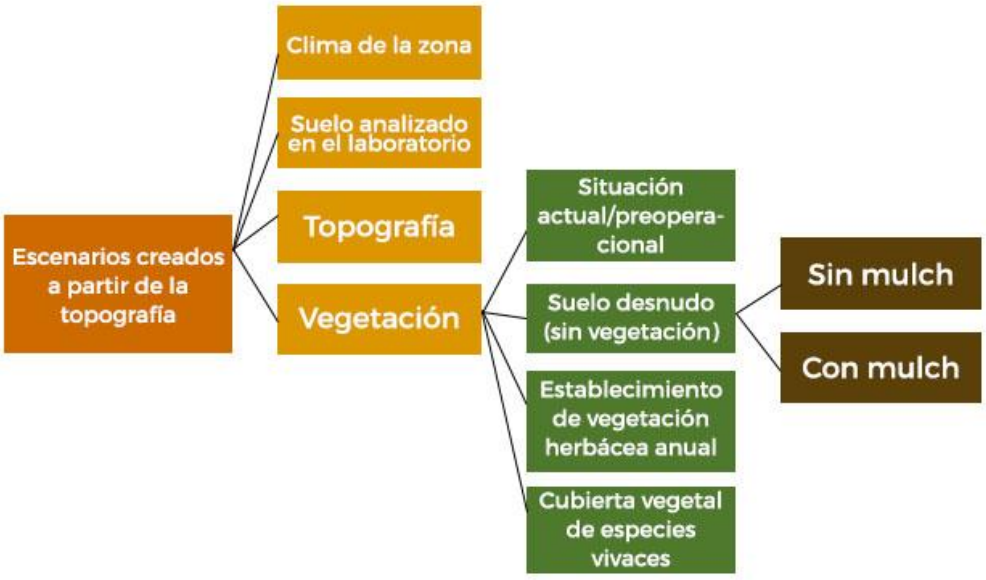


Figura 3. Modelo conceptual de los escenarios seleccionados

De esta manera, se analizarán las diferentes situaciones que permitirán detallar con más precisión la pérdida de suelo de una parcela según el tratamiento o medida correctora que se implemente. Para introducir las variables deseadas en el programa RUSLE v.2., se realizaron las siguientes transformaciones de variables:

4.2.9 Variable “Tipo de suelo”

Dentro del software RUSLE v.2. deben introducirse los datos relacionados con la textura, pedregosidad y la materia orgánica del suelo.

Estos valores se obtienen a partir de las observaciones de campo y de las muestras recogidas en campo.

4.2.10 Variable “Datos climáticos”

Los datos de climáticos deben corresponder con los valores climáticos más cercanos y representativos a la zona de estudio. Se seleccionaron las de los aeropuertos aeródromos más cercanos por la robustez de sus series de datos. Se utilizaron los valores de precipitación y temperatura mensual de las estaciones localizadas en el Aeropuerto de Bajaras y Getafe en la Comunidad de Madrid y Guadalajara en Castilla La Mancha (Agencia Estatal de Meteorología [AEMET], 2021). Dentro del clima modificado en RUSLE v.2., los datos de temperatura media mensual, la precipitación media mensual y el factor R asociado a cada mes.

4.2.11 Variable “Topografía”

En la metodología original de la USLE, se predetermina una parcela tipo para determinar el factor LS longitud e inclinación de la pendiente. Esta parcela tiene unas dimensiones de 25 metros de longitud de ladera y un 9 % de pendiente.

Para caracterizar la topografía de los diferentes escenarios en el programa RUSLE 2, se ha designado una longitud de ladera de 25 metros (igual que la recomendad por la USLE), pero con el porcentaje de pendiente real de cada uno de los escenarios analizados.

Para la asignación de pendiente a los escenarios, se utilizará el promedio medio de pendiente que contiene dicha parcela. Por ejemplo, si un escenario contiene una pendiente entre el 12 y 15 %, se determinará en el programa una pendiente igual a 13,5 %.

4.2.12 Variable “Cubierta vegetal”

El software RUSLE v.2. facilita una gran base de datos en referencia a la cubierta vegetal del suelo. De esta manera, ofrece la posibilidad de elegir entre sus múltiples variables relacionadas con la vegetación e implementarlas en la metodología RUSLE.

En los escenarios a analizar, se establecen cuatro tipos de cubiertas vegetales diferentes, todas ellas relacionadas con el proceso de sucesión ecológica que se establecería en el lugar tras la instalación de la planta solar fotovoltaica. De esta manera, la vegetación seleccionada es:

- Vegetación actual (dependiendo del proyecto de análisis, en este caso serían cultivos y olivares)
- Sin vegetación, después de la fase de construcción.
- Vegetación instalada taras las medidas correctoras.
- Vegetación madura

4.2.13 Variable “Manejo del suelo”

Una de las medidas preventivas más importantes a implementar en actuaciones de construcción para controlar la erosión es añadir manejos del suelo que protejan este medio de la pérdida de sedimento. Por ello, en el programa RUSLE v.2. se incorporará una opción de manejo del suelo cuando no se encuentre vegetación en la zona. Habrá un primer manejo del suelo que sea la no implantación de cobertura de mulch (capa de paja) y otro manejo con mulch.

5 RESULTADOS

5.1 FASE I: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSLE EN GIS

Para la aplicación y obtención del mapa de erosión se lleva a cabo la siguiente cartografía, que se puede observar en el apéndice 1:

- **Mapa topográfico. Escala 1:25.000**. Se ha utilizado como base del mapa las ortofotos del Plan Nacional de Ortofografía Aérea (PNOA) de la zona, generando curvas de nivel cada 10 metros a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:25.000.
- **Mapa de altitud. Escala 1:25.000**. Se ha obtenido a partir de la reclasificación del MDE.
- **Mapa de orientaciones. Escala 1:25.000**. Se ha obtenido a partir de una reclasificación del MDE mediante la herramienta de ArcGis “*Orientaciones*”.

- **Mapa de pendientes. Escala 1:25.000.** Se ha obtenido mediante el uso de la herramienta "*Slope*" de ArcGis aplicada sobre el MDE.
- **Mapa geológico. Escala 1:25.000**. Se ha utilizado como base cartográfica las hojas 582 y 583 del MAGNA50, publicado por el IGME.
- **Mapa de vegetación y usos del suelo. Escala 1:25.000**. Para su desarrollo se ha utilizado el Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España (2000-2009) a escala 1:50.000.
- **Mapa factor K. Escala 1:25.000**. Para el cálculo del factor K (erodibilidad), y su posterior transformación cartográfica para obtener la erosividad del suelo, se han utilizado los datos del Mapa geológico, clasificando el terreno de acuerdo con la metodología utilizada por Gisbert, Ibáñez y Moreno (2012).
- **Mapa factor LS. Escala 1:25.000.** Para el cálculo del factor LS (factor topográfico), se calculó la componente "L" (longitud de ladera) y "S" (inclinación de la pendiente") mediante el uso de la ecuación de Oliveira *et al*. (2015).
- **Mapa factor C. Escala 1:25.000.** Para el cálculo del factor C (cubierta vegetal), ha sido necesario realizar una conversión de los datos de cubierta vegetal del Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España a una vegetación reconocida y medida por la ecuación RUSLE, identificando aquellas cubiertas vegetales iguales o similares del Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España a las aparecidas en Wischmeier y Smith (1978), completando dicho proceso con los datos aportados por Gisbert, Ibáñez y Moreno (2012).
- **Mapa de Riesgo de Erosión. Escala 1:25.000**. Se obtiene tras la aplicación de todos los factores en la ecuación RUSLE.

De acuerdo a dicha cartografía, el estudio ha identificado un 6% de superficies con pendientes por encima del 12%, donde, por causas aplicadas a la obra civil, no sería aconsejable la instalación de paneles solares fotovoltaicos (Figura 4 y Tabla 1).

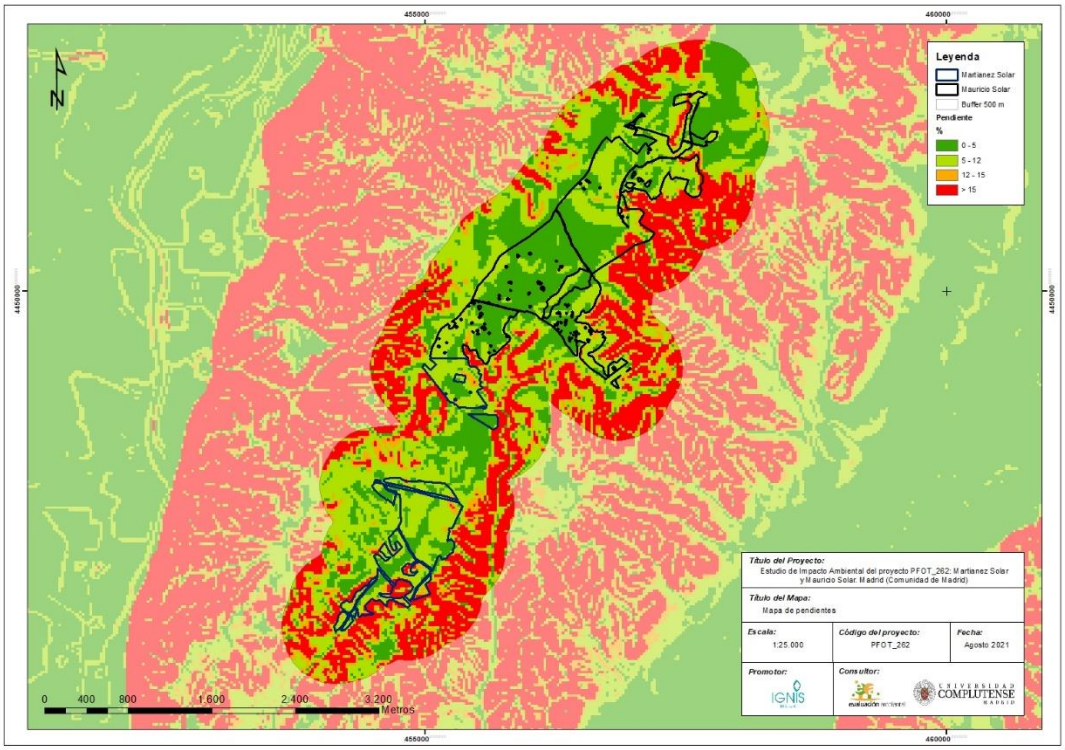


Figura 4. Mapa de pendientes del PFOT 262

Tabla 1 Clasificación del terreno según el porcentaje de pendiente

Pendiente (%)	Superficie (m²)	Superficie (ha)	Porcentaje de la superficie (%)
0 – 5	1354375	135,44	46,71
5 – 12	1373750	137,38	47,38
12 – 15	105625	10,56	3,64
> 15	65625	6,56	2,26

La cartografía geológica[2][3] nos indica que hay diversidad de materiales originales de los suelos dentro de este proyecto. En la PFV "*Mauricio Solar*" se localizan, en su mayoría, "Conglomerados, areniscas, arenas, arcillas y margas" con un afloramiento de "Calizas, calizas tobáceas, margas, arcillas, areniscas, conglomerados y caliches" en la parte sureste del territorio.

[2] http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0582.pdf

[3] http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0583.pdf

En la PFV "*Martianez Solar*" puede observarse en la parte norte del territorio "Conglomerados, areniscas, arenas, arcillas y margas". En la parte sur del solar, se localizan "Yesos masivos, yesos especulares y margas yesíferas" junto con "Margas blancas, calizas, arenas y yesos laminares" (Figura 5).

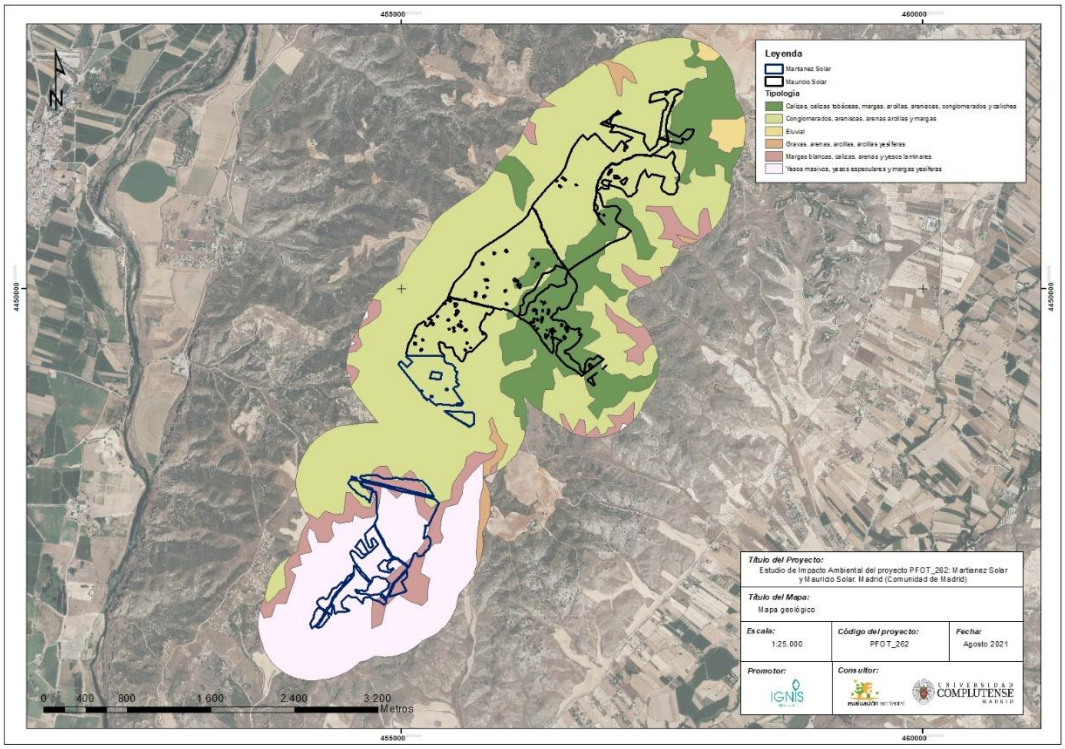


Figura 5. Mapa geológico del PFOT 262

En relación al factor de erodibilidad del suelo, es decir, la capacida del suelo a ser erosionado o a su resistencia estas PFVs contienen un factor K comprendido entre 0,3 y 0,2 excepto en el solar "Martianez Solar" que cuenta con un factor K igual a 0,6 (Figura 6). En la siguiente tabla (Tabla 2) se expone la relación entre la diversa geología presente en el proyecto y el factor K.

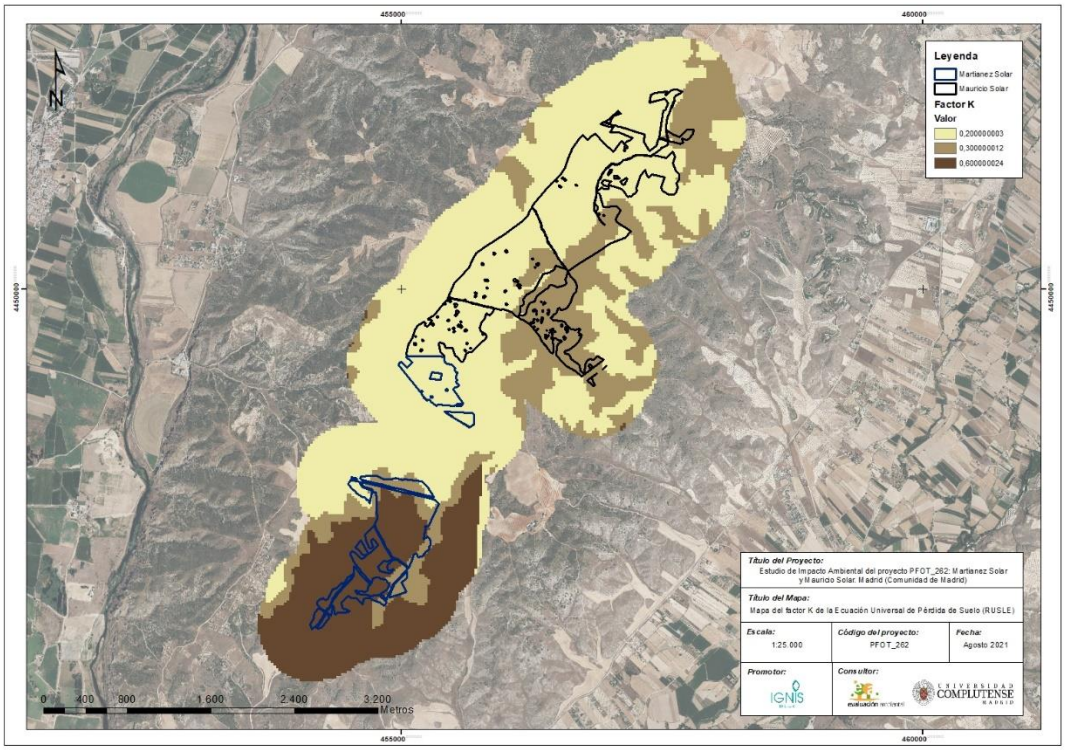


Figura 6. Mapa del cálculo del factor K para el PFOT 262

Tabla 2. Relación entre el tipo de geología y el factor K de la ecuación RUSLE (Gisbert, Ibáñez y Moreno, 2012).

Tipo de suelo	Factor k
Conglomerados, areniscas, arenas arcillas y margas	0,2
Yesos masivos, yesos especulares y margas yesíferas	0,6
Gravas, arenas, arcillas, arcillas yesíferas	0,2
Margas blancas, calizas, arenas y yesos laminares	0,3
Eluvial	0,2
Calizas, calizas tobáceas, margas, arcillas, areniscas, conglomerados y caliches	0,3

El territorio está compuesto por cultivos de secano con algún afloramiento de matorral, arbolado, cultivos de *Olea europea* y cultivos de *Vitis vinífera*.

Con respecto a la cubierta vegetal (factor C), tras la conversión de los datos aportados por el Mapa de usos del suelo y aprovechamientos de España, se obtienen los siguientes datos (Tabla 3):

Tabla 3 Relación entre el tipo de vegetación y usos del suelo con el factor C de la ecuación RUSLE (Wischmeier y Smith, 1978; Gisbert, Ibáñez y Moreno, 2012).

Mapa usos del suelo y aprovechamientos de España	Clasificación según USLE	Valor C
Labor de secano intensiva	Cereal/cereal	0,31
Matorral	Matorral con buena cobertura	0,08
Viñedo	Viñedo	0,54
Pastizal/Matorral	Matorral ralo y eriales	0,2
Olivar	Olivar	0,4
Arbolado forestal denso	Arbolado forestal denso	0,01
Improductivo	Suelo desnudo	1
Erial y pastos	Matorral ralo y eriales	0,2
Frutales secano	Cultivos arbóreos	0,4
Laboreo secano con mosaico arbóreo	Laboreo secano con mosaico arbóreo	0,31

Además de dicha cartografía, para la evaluación del riesgo de erosión, se ha calculado el Factor P (prácticas de conservación del suelo), que, dado que las parcelas no contemplan prácticas de manejo del suelo complejas y se observa labrado a favor de la pendiente, olivares y viñedos, por lo que debe ser 1.

Por último, según se muestra en la siguiente tabla (Tabla 4) el 88,97% del terreno presenta condiciones favorables para el desarrollo del parque fotovoltaico sin riesgo potencial de erosión. El 11,04% del terreno restante presenta una pérdida de suelo mayor a 10 t ha^{-1} $año^{-1}$, asociado a lugares con una alta pendiente y un factor K elevado (Figura 7). Estas zonas serán de aplicación las medidas preventivas desarrolladas en el EsIA en materia de control de la erosionabilidad.

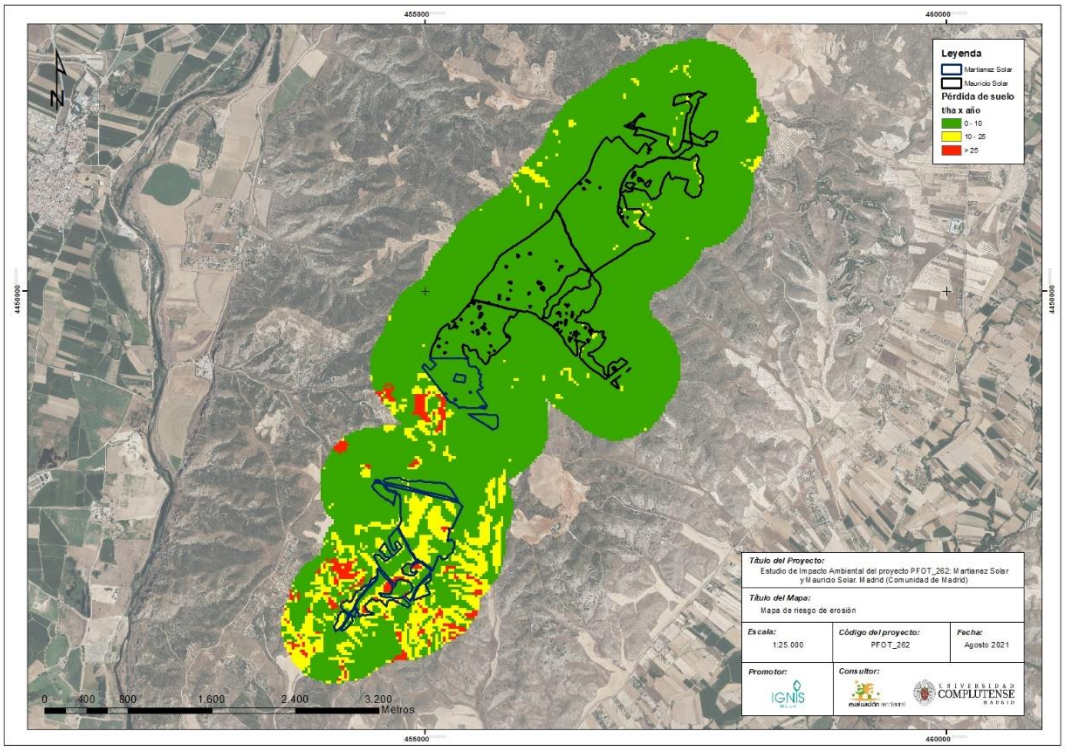


Figura 7. Mapa de riesgo de erosión del PFOT 262

Tabla 4. Porcentaje de superficie según la pérdida de suelo por t ha^{-1} $año^{-1}$

Pérdida de suelo t ha^{-1} $año^{-1}$	Superficie (m^2)	Superficie (ha)	Porcentaje de la superficie (%)
0 – 10	2575000	257,5	88,97
10 – 25	292500	29,25	10,11
> 25	26875	2,69	0,93

Dicha pérdida de suelo se encuentra, principalmente, asociada a lugares con elevadas pendientes y un facto K elevado.

A continuación, se muestra el detalle de los resultados para cada una de las PFV proyectadas.

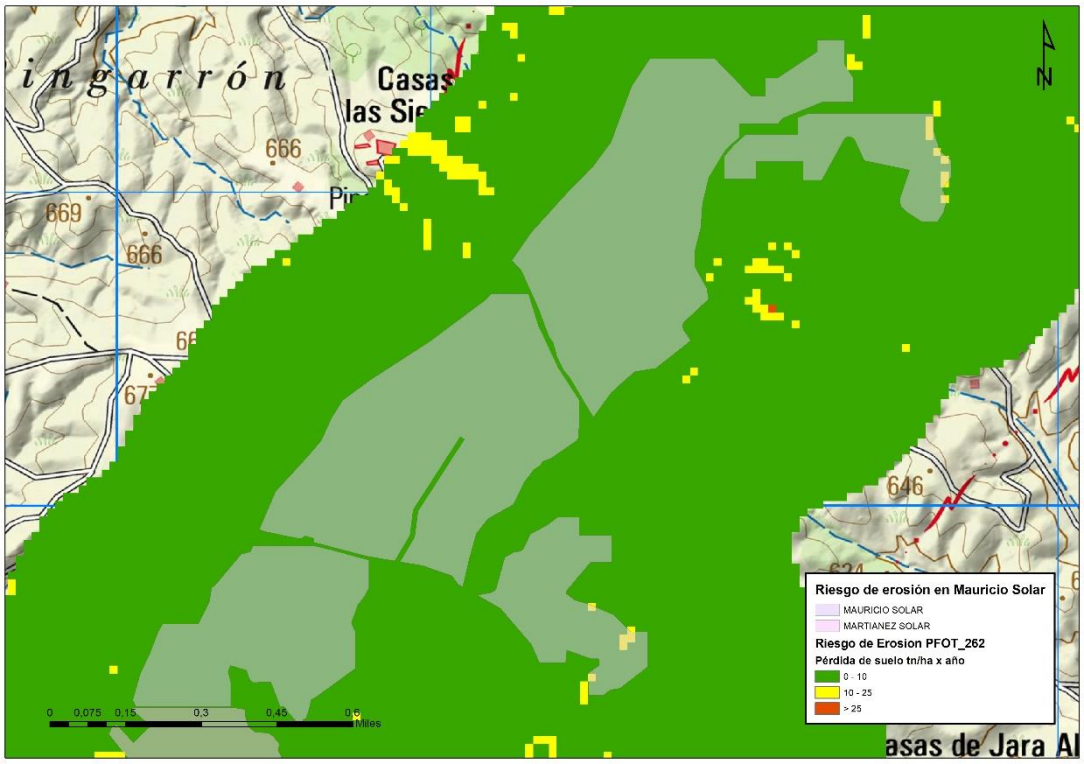


Figura 8 Coincidencia entre zonas con pérdida de suelo superior a 10 t ha^{-1} año^{-1} y el Layout de Mauricio Solar

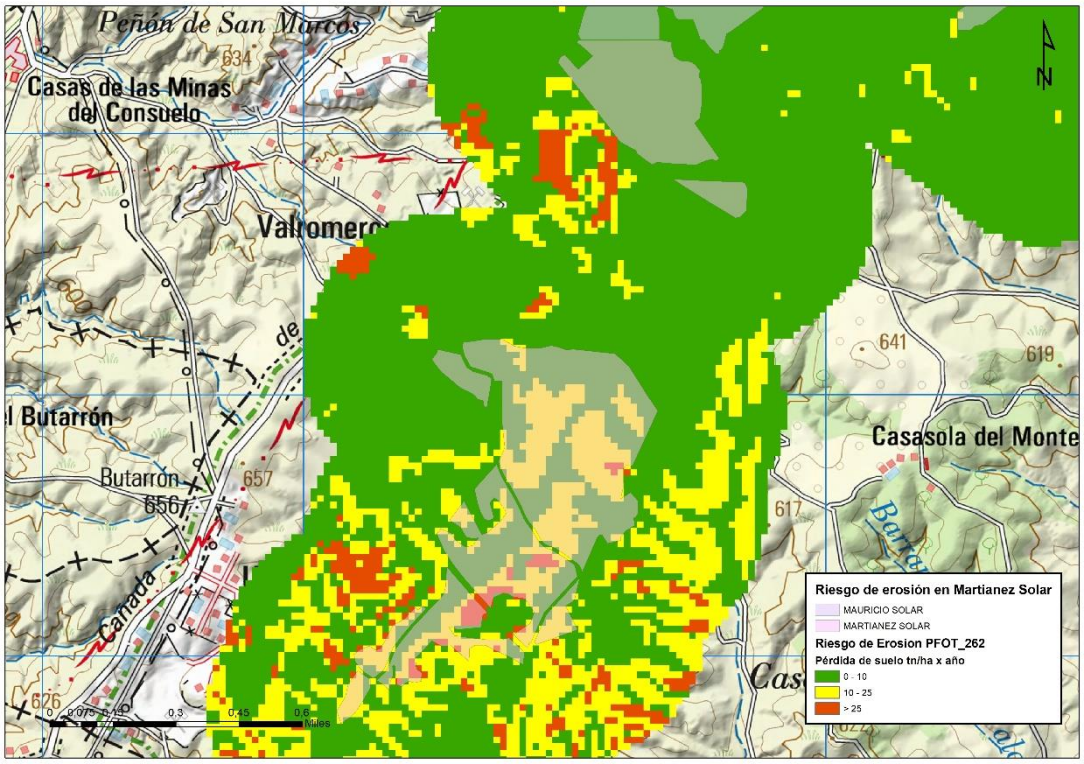


Figura 9 Coincidencia entre zonas con pérdida de suelo superior a 10 t ha^{-1} año^{-1} y el Layout ampliado de Martianez Solar

Tal y como se puede apreciar en las figuras anteriores, existe coincidencia entre la implantación de los paneles solares de Mauricio Solar y Martianez, y terrenos con pérdida de suelo superior a las 10 t ha^{-1} $año^{-1}$, encontrando valores de más de 25 t ha^{-1} $año^{-1}$ en Martianez Solar.

En estos espacios con elevada pérdida de sedimento, ha resultado, por lo tanto, de aplicación el uso del programa RUSLE v.2, para lo cual, durante los trabajos previos, se tomaron muestras de suelo, que se analizaron en laboratorio, con el fin de conocer sus propiedades físicas y químicas, y poder determinar con mayor precisión la erodibilidad del mismo, identificando así aquellos suelos más sensibles.

5.2 FASE II: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN RUSLE V 2.0 EN ZONAS IDENTIFICADAS CON RIESGO ALTO DE EROSIÓN

Analizando los resultados obtenidos se realizó un estudio en detalle para aquellas zonas que tuvieran una alta pérdida de suelo con el programa RUSLE v.2. A continuación, se presentan a modo de síntesis los datos obtenidos en campo, en laboratorio y el análisis en profundidad con el programa RUSLE v.2.

5.2.1 Aplicación del modelo RUSLE al campo

Se realizó una salida de campo al área de implantación de las PFV el día 30 de agosto de 2021 con la intención de recoger muestras de suelo y observar si el modelo que se ha realizado corresponde con la realidad.

De esta forma, se pudo determinar que el suelo corresponde con el Mapa Geológico. En la parte sur de “Martianez Solar” no se pudo determinar el tipo de suelo debido a que todo el territorio estaba compuesto por cotos de caza privados.

Algunos lugares del territorio tienen ondulaciones, aunque no superan un 10% de pendiente, como en el norte de “Mauricio solar”. Pueden observarse rasgos de erosión en la zona, derivados de la labranza a favor de la pendiente de los cultivos y erosión por la presencia de grietas de retracción, asociadas a las arcillas, lo que genera canales preferentes de flujo principalmente en las áreas donde predominan las calizas.

En el interior de las parcelas de estudio, se observan, en su gran mayoría, cultivos de secano de cebada protegidos por un mulch de paja junto con cultivos de *Olea europea*. En general, casi todos los olivares que se encuentran en la zona de estudio no se incluyen dentro del proyecto. También, se observan *Prunus dulcis* en los

alrededores de los solares y *Quercus ilex* y *Onopordum acanthium* dentro de las zonas de estudio. Hay que destacar que, la gran mayoría del terreno está compuesto por cotos de caza privados donde la entrada no está permitida, lo que condiciona la visita a este emplazamiento.

Si se analiza el Mapa de Riesgos de Erosión creado con el modelo RUSLE y la salida de campo, prácticamente todo el territorio es apto desde el punto de vista de la erosión, aunque sería necesario realizar estudios de detalle en las zonas asociadas a los yesos.

5.2.2 Resultados obtenidos en laboratorio

Las propiedades químicas y físicas que caracterizan un suelo confieren a estos diferentes grados de protección frente a la erosión hídrica. El estudio, por tanto, de las cualidades del suelo, es importante para determinar la capacidad de un suelo a ser erosionado por el agua. Esta propiedad del suelo es conocida como erodibilidad y permite identificar a los suelos más sensibles, así como el establecimiento de las medidas protectoras y correctoras más adecuadas para cada situación.

En general, la propiedad más importante en este tipo de proceso es la estructura, que deriva de la textura y la materia orgánica, que condiciona las propiedades físicas del suelo y por tanto las tasas de infiltración y erosión claves en la erosión del suelo. De manera paralela, se procedió a analizar el pH y la conductividad eléctrica del suelo con el fin de buscar patrones significativos derivados de los factores formadores de los suelos.

Para poder determinar la erodibilidad con la mayor precisión posible en cada una de las zonas del terreno, se procedió a analizar en el laboratorio las muestras recogidas de los diferentes emplazamientos seleccionados. El muestreo se llevó a cabo en las visitas a campo efectuadas en durante los meses de julio, agosto y septiembre del año 2021.

Las muestras recogidas son las representativas de la geología y edafología existente en las zonas de estudio.

Las muestras tomadas fueron:

- Toma de 1 muestra en zona de Conglomerado
- Toma de 1 muestra en zona de Caliza

Los resultados de las muestras de suelo analizadas en el laboratorio se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados obtenidos en el laboratorio de las muestras recogidas en el PFOT_262

Muestra	Textura	% Arenas	% Limos	% Arcillas	% M.O.	pH	Conductividad (mS/cm)
PFot 262 (Conglomerado)	Franco arcillo arenoso	63,18	5,75	31,07	1,48	8,44	0,14
PFot 262 (Caliza)	Franco arcillo arenoso	59,83	13,1	27,07	0,93	9,04	0,16

Destacan los suelos con textura franco arcillo arenosa, con un porcentaje de materia orgánica bajo con valores promedio comprendidos entre el 1-2 %, datos muy habituales en suelos agrícolas. Son suelos con valores de pH básicos (8-9) típicos de los materiales a partir de los cuales se desarrollan. Los valores de conductividad eléctrica son bajos, por lo que no hay gran presencia de yesos.

5.2.3 Resultados obtenidos en el programa RUSLE v.2.

Dentro del PFOT 262 se observan 3 escenarios potencialmente erosivos.

La leyenda de dichas superficies puede consultarse en las Tablas 6, 7, 8 y 9.

Tabla 6. Análisis de los escenarios significativos que necesitan medidas correctoras dentro del PFOT_262

Escenario Código	Superficie (m²)	Superficie (ha)	% Superficie relativa
452	208125	20,81	3,45
652	129375	12,94	2,14
852	40625	4,06	0,67

Tabla 7. Códigos asignados según el tipo de vegetación existente en las zonas de estudio

Tipo de vegetación	Código
Agua	100
Suelo desnudo	200
Cultivo de regadío	300
Cultivo secano	400
Matorral	500
Olivar	600
Arbolado	700
Viñedo	800
Pastizal	900

Tabla 8. Códigos asignados según el tipo de suelo existente en las zonas de estudio

Tipo de suelo	Geología incluida en la cartografía	Código
Materiales fuertemente arenosos con o sin calizas	Arenas arcósicas y limos arenosos. Terrazas medias del Manzanares	10
	Arenas micáceas, limos y calizas	
	Areniscas feldespáticas	
Limos de diversa naturaleza	Limos pardos, arenas y gravas. Fondos de valle	20
	Limos arenosos rojizos. Glacis	
	Limos negros. Navas	
	Limos rosados con cantos. Abanicos aluviales	
Materiales con presencia de yeso	Arenas micáceas, margas grises, margas blancas y yesos laminares	30
	Arcillas yesíferas, arenas, arcillas	
	Yesos secundarios y lutitas verdes	
Rocas sedimentarias ricas en limo	Lutitas rojas y verdes con nódulos de yeso	40
	Lutitas con niveles de arenas	
Material sedimentario de origen diverso	Conglomerados, cantos poligénicos, etc.	50
Material arcilloso	Arcillas	60
Material con presencia de caliza	Calizas	70

Tabla 9. Códigos asignados según el porcentaje de pendiente existente en las zonas de estudio

Pendiente (%)	Código
0 – 5	1
5 – 12	2
12 – 15	3

Dentro de estos escenarios se evaluó la tasa de erosión en el estado actual, en la fase de construcción (suelo desnudo), con la aplicación de mulch sobre suelo desnudo y aplicando revegetación (tanto después de un año de implantación (revegetación con herbáceas anuales) como después de 2/3 años de su establecimiento (revegetación con especies de vegetación en estado maduro)), con el fin de analizar el impacto potencial de la instalación de las plantas fotovoltaicas en los emplazamientos seleccionados y la eficacia de estos escenarios (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados de los escenarios obtenidos del procesamiento en el programa RUSLE 2.

Escenario	Descripción	Fase preoperacional (estado actual) t/ha/yr	Fase de construcción (t/ha/yr)	Aplicación de mulch de paja (t/ha/yr)	Revegetación con herbáceas anuales (t/ha/yr)	Revegetación con especies de vegetación en estado maduro (t/ha/yr)
452	Cultivo de secano formado por material sedimentario de origen diverso y pendiente media	2.8	9.2	3.8	0.87	1.4
652	Olivar formado por material sedimentario de origen diverso y pendiente media	7	9.2	3.8	0.9	1.4
852	Viñedo formado por material sedimentario de origen diverso y pendiente media	7	9.2	3.8	0.9	1.4

Leyenda:

Menos de 5 t/ha/yr	Entre 5 y 10 t/ha/yr	Entre 10 y 20 t/ha/yr	Más de 20 t/ha/yr

Los escenarios del proyecto PFOT 262 presentan una erosión mayor de 10 t ha^{-1} $año^{-1}$ a partir de la metodología ArcGis, pero no alcanzan esas tasas de erosión si se analizan con el software RUSLE v.2. Estos hechos se explican por el aumento del nivel de detalle que contiene el programa RUSLE v.2., que es mucho mayor que la metodología utilizada anteriormente. En general, los valores utilizados en el programa RUSLE de suelo, clima, manejo y cubierta del suelo son mucho más reales que los utilizados en ArcGis.

Estos escenarios deben ser reclasificados como aptos para implementar un parque solar fotovoltaico, ya que no presentan problemas de erosión dentro de ellos.

Las simulaciones realizadas incluyendo el uso del mulch son claramente positivas disminuyendo la erosión hídrica casi a la mitad sobre los valores iniciales y asegurando que, en todas las situaciones, el escenario evaluado se encuentra por debajo del umbral de erosión establecido.

6 CONCLUSIONES

Con el objetivo de llevar a cabo el estudio del riesgo de erosión derivado del proyecto analizado, dando atención a las recomendaciones publicadas por el Ministerio de Transición Ecológica y el reto Demográfico (MITERD) durante el año 2020 en relación con el estudio de la pérdida de suelo en caso de instalaciones solares fotovoltaicas, se firmó un contrato con el grupo de investigación Fitosolum de la UCM para el cálculo de pérdida de suelo mediante la aplicación del método RUSLE.

El trabajo realizado ha consistido:

- En primer lugar, se desarrolla una cartografía del riesgo de erosión de los emplazamientos interpolando los valores asociados al método RUSLE mediante el uso del programa ArcGis y fuentes cartográficas oficiales.
- En aquellos casos en los que los resultados cartográficos mostraron resultados de pérdida de suelo superiores a 10 t ha^{-1} $año^{-1}$, se utilizó la herramienta informática RUSLE v.2, que permite analizar diferentes escenarios posibles que pueden surgir en un territorio. Para ello, fue necesaria la toma y el análisis de muestras de suelo del emplazamiento.

Como apéndices se aportan los resultados cartográficos obtenidos tras la aplicación del software ArcGis y RUSLE v.2., incluyendo cartografía temática generada con los resultados (mapa de riesgo de erosión y mapa de aplicación de mulch de paja) y memoria fotográfica.

El análisis RUSLE en GIS muestra que habrá pérdidas de suelo superior a las 10 t ha^{-1} $año^{-1}$ en las áreas de implantación de la PFVs Mauricio Solar y Martianez Solar. En base a este resultando ha sido necesario la aplicación del programa RUSLE v.2. **Mediante este análisis se examina que a partir de la metodología ArcGis se observan altas pérdidas de sedimento, pero no alcanzan esas tasas de erosión si se analizan con el software RUSLE v.2. Estos hechos se explican por el aumento del nivel de detalle que contiene el programa RUSLE v.2., que es mucho mayor que la metodología utilizada anteriormente. En general, los valores utilizados en el programa RUSLE de suelo, clima, manejo y cubierta del suelo son mucho más reales que los utilizados en ArcGis.**

Durante la aplicación del programa de vigilancia ambiental en la fase de obras se supervisará la aparición de procesos erosivos. En caso de aparación se implementarán trabajos específicos de seguimiento.

7 BIBLIOGRAFÍA

Cermeño, I. 2017. *Influencia de los patrones de laboreo sobre la respuesta erosiva durante episodios extremos de erosión en paisajes agrícolas de secano mediterráneo*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Gisbert, JM., Ibáñez, S. y Moreno, H. 2012. *El factor K de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE)*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio, Universitat Politécnica de Valencia. http://hdl.handle.net/10251/16850.

González del Tánago, M. 1991. La ecuación universal de perdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología, 5, 13-50.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Alcance de estudio de impacto ambiental de proyecto de parque fotovoltaico terrestre. Red de Autoridades Ambientales. Versión final 14/12/2020. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/red-de-autoridades-ambientales-raa/alcanceesiaparquefotovoltaicogtraafinal_tcm30-523230.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (2021). GeoPortal. Recuperado de: https://sig.mapama.gob.es/geoportal/

Oliveira, J. A., Domínguez, J. M. L., Nearing, M. A. y Oliveira, P. T. S. 2015. A GIS-based procedure for automatically calculating soil loss from the Universal Soil Loss Equation: GISus-M. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 31(6), 907-917. doi: 10.13031/aea.31.11093.

Renard K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. y Yoder, D. C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Washington DC.

Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predieting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook, 537.



Apéndice 1. Cartografía

455000 000000

460000 000000

4450000 000000

4450000 000000

Leyenda

- Martianez Solar
- Mauricio Solar
- Buffer 500 m
- Curvas de nivel

0 400 800 1.600 2.400 3.200 Metros

Título del Proyecto:

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:

Mapa topográfico

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000 000000

460000 000000

455000 000000

460000 000000

4450000 000000

4450000 000000

N

Leyenda

- Martianez Solar
- Mauricio Solar
- Buffer 500 m

Altitud

Metros

High : 745,167

Low : 493,469

0 400 800 1.600 2.400 3.200

Metros

455000 000000

460000 000000

Título del Proyecto:

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:

Mapa de altitud

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor:

IGNIS ENERGÍA

Consultor:

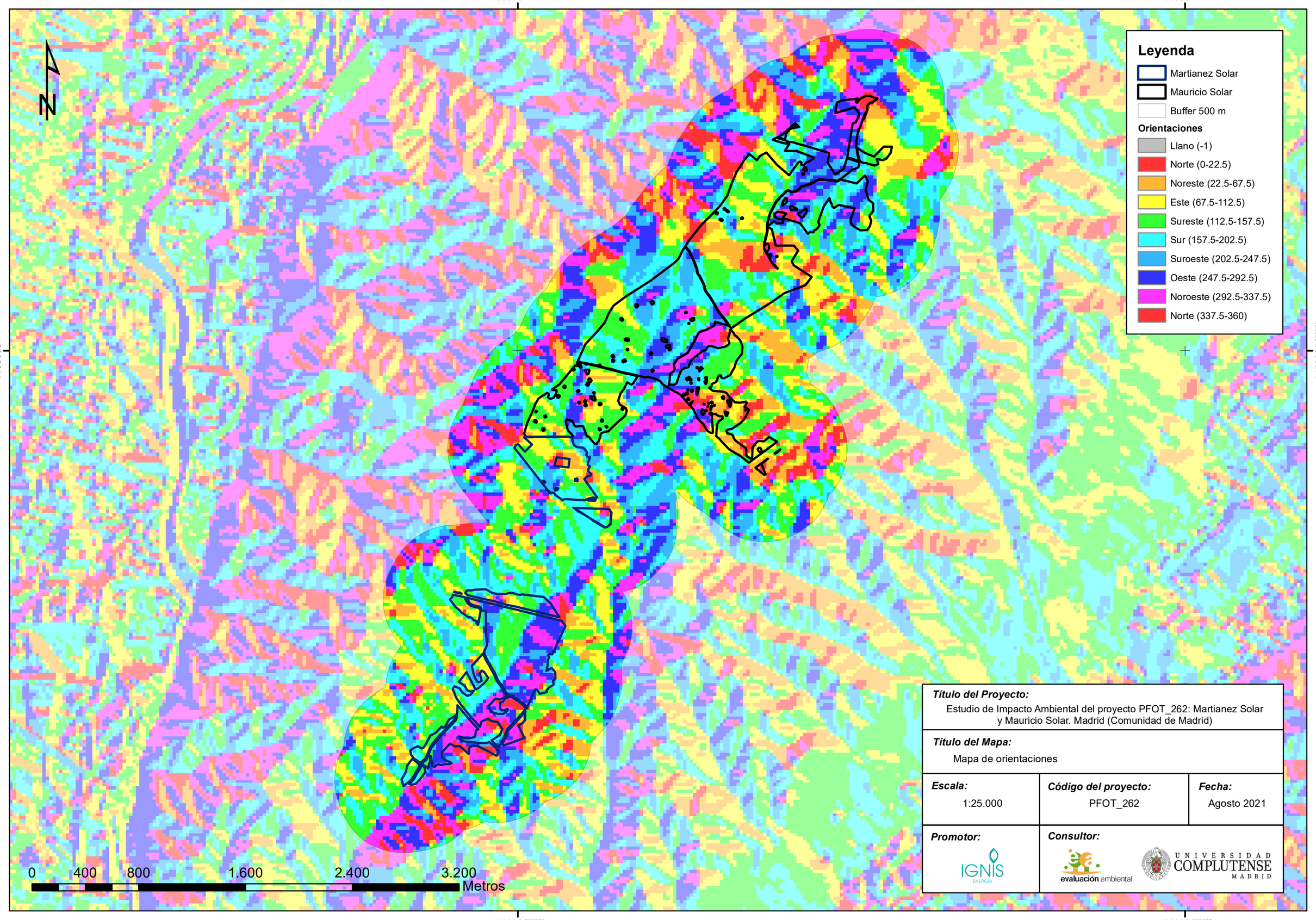
evaluación ambiental

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000 000000

460000 000000

4450000 000000



Título del Proyecto:
Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:
Mapa de orientaciones

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000 000000

460000 000000

455000 000000

460000 000000

4450000 000000

4450000 000000

N

Leyenda

- Martianez Solar
- Mauricio Solar
- Buffer 500 m

Pendiente

%

- 0 - 5
- 5 - 12
- 12 - 15
- > 15

0 400 800 1.600 2.400 3.200

Metros

455000 000000

460000 000000

Título del Proyecto:

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:

Mapa de pendientes

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

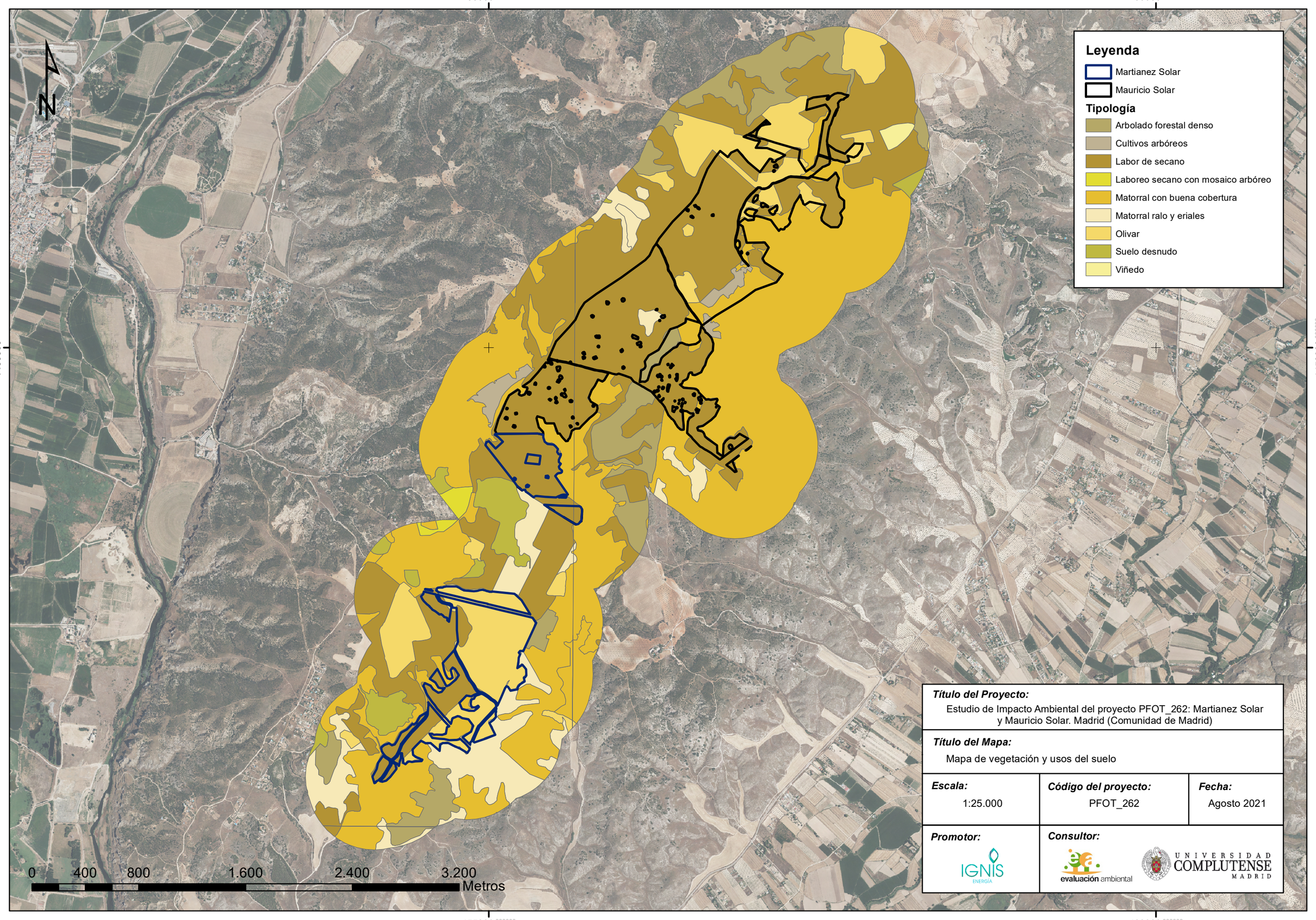
Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000.000000

460000.000000

4450000.000000



Título del Proyecto:

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:

Mapa de vegetación y usos del suelo

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000.000000

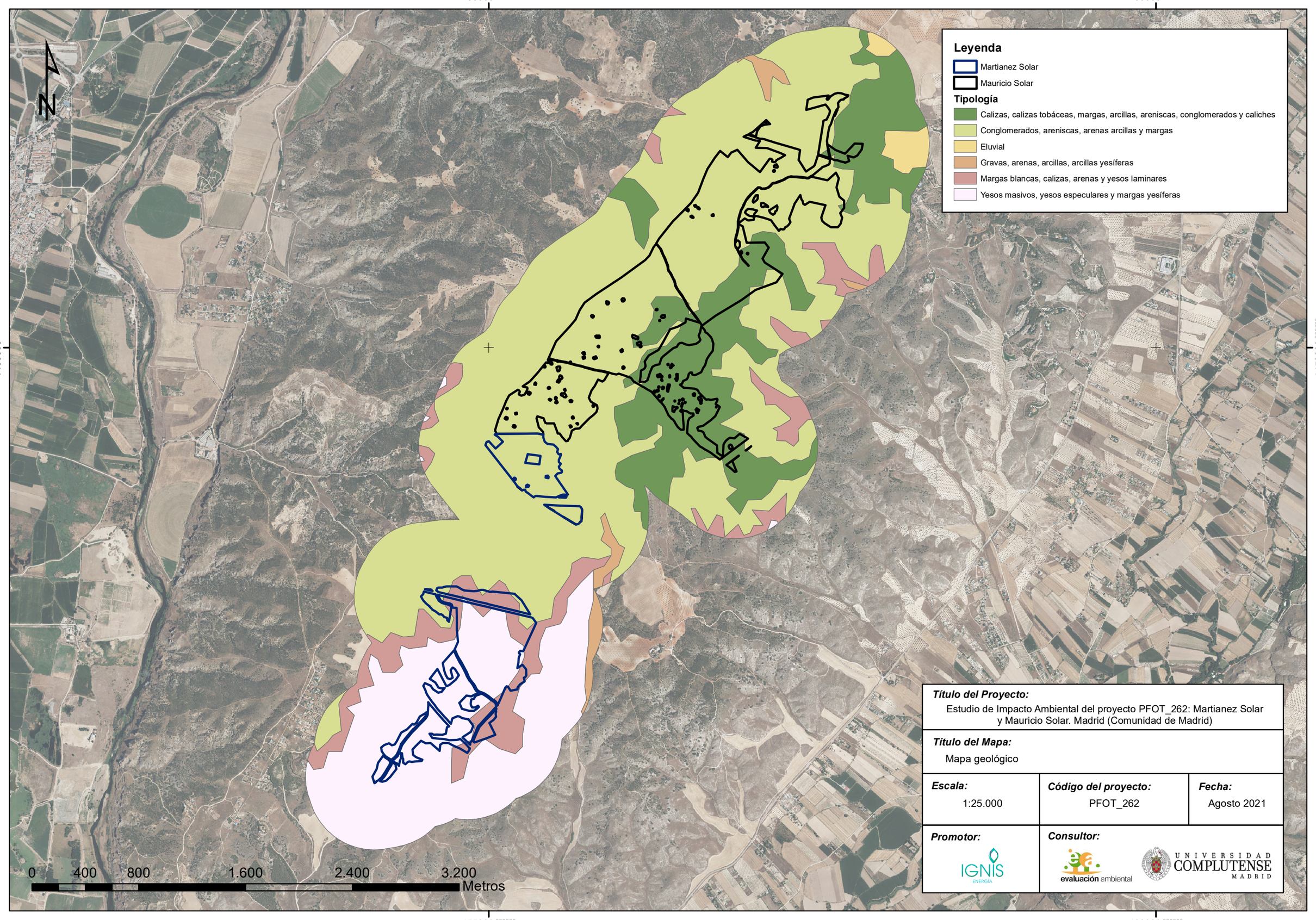
460000.000000

4450000.000000

455000.000000

460000.000000

4450000.000000



Título del Proyecto:
Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:
Mapa geológico

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000.000000

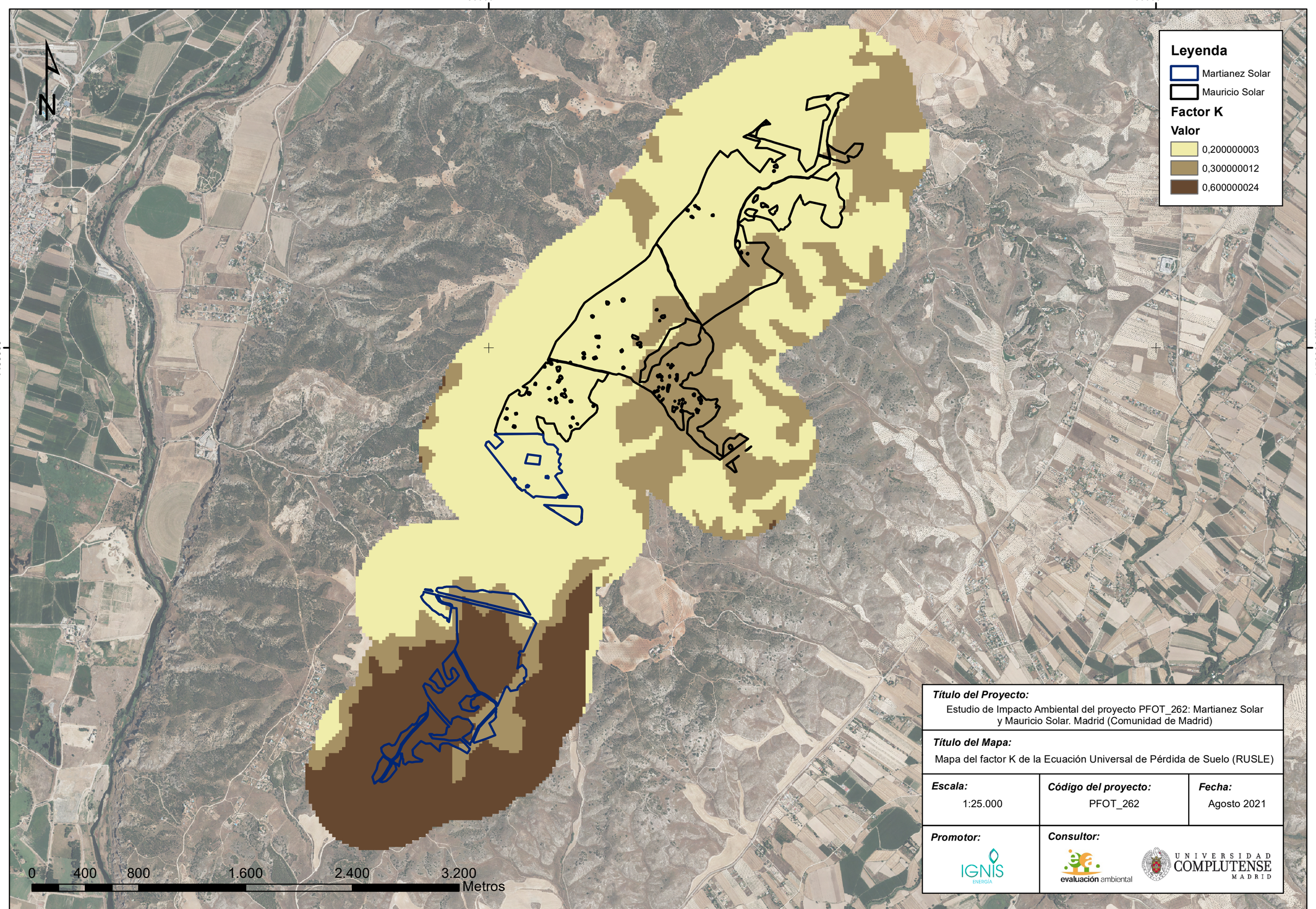
460000.000000

4450000.000000

455000.000000

460000.000000

4450000.000000



Título del Proyecto:

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:

Mapa del factor K de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE)

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

455000.000000

460000.000000

4450000.000000

455000 000000

460000 000000

4450000 000000

N

Leyenda

Martianez Solar

Mauricio Solar

Factor LS

Valor

High : 9,74102

Low : 0,0360562

0 400 800 1.600 2.400 3.200

Metros

Título del Proyecto:

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:

Mapa del factor LS de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE)

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

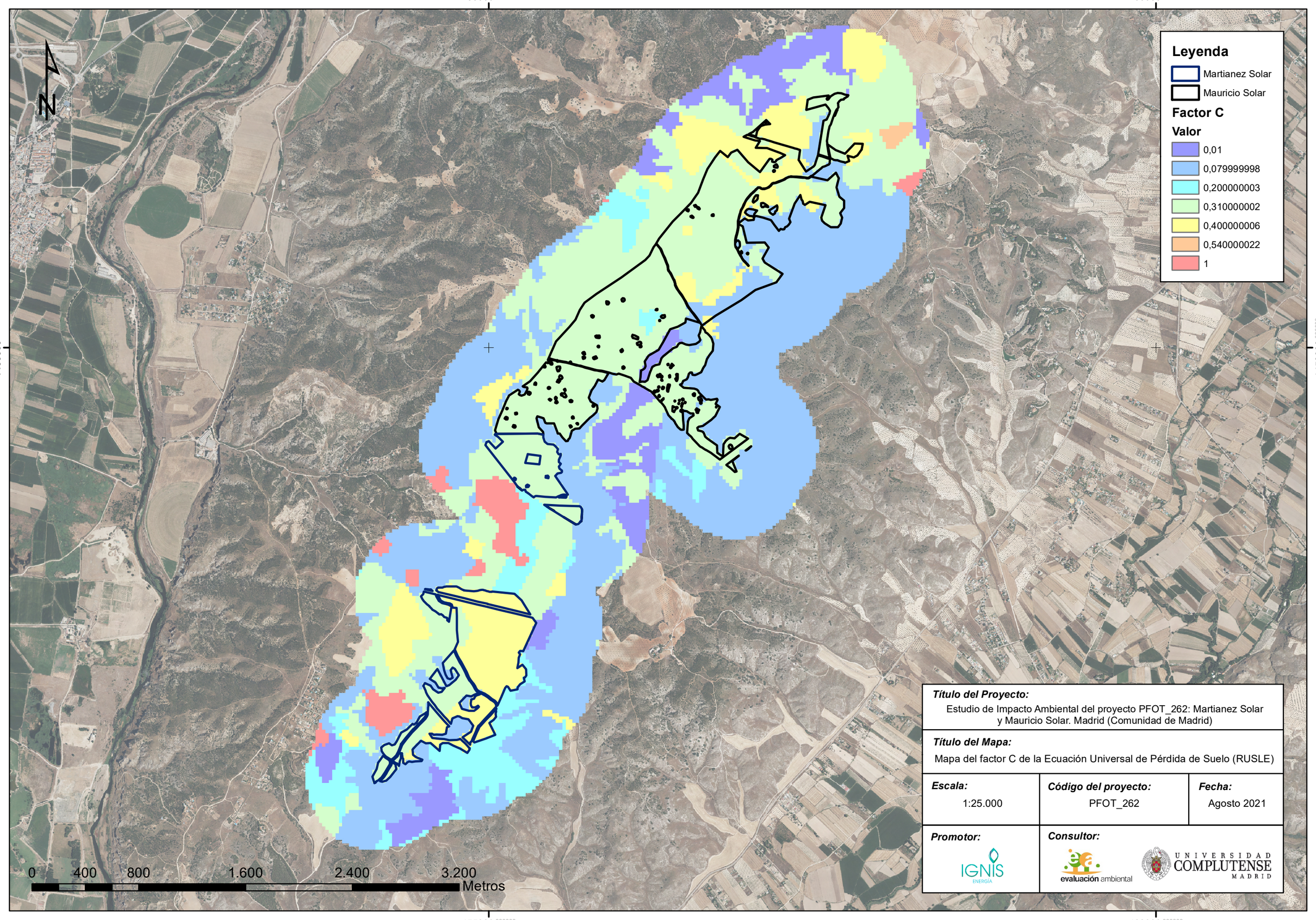
455000 000000

460000 000000

455000.000000

460000.000000

4450000.000000



Título del Proyecto: Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)		
Título del Mapa: Mapa del factor C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE)		
Escala: 1:25.000	***Código del proyecto:*** PFOT_262	***Fecha:*** Agosto 2021
Promotor: IGNIS ENERGÍA	***Consultor:*** evaluación ambiental / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	

455000.000000

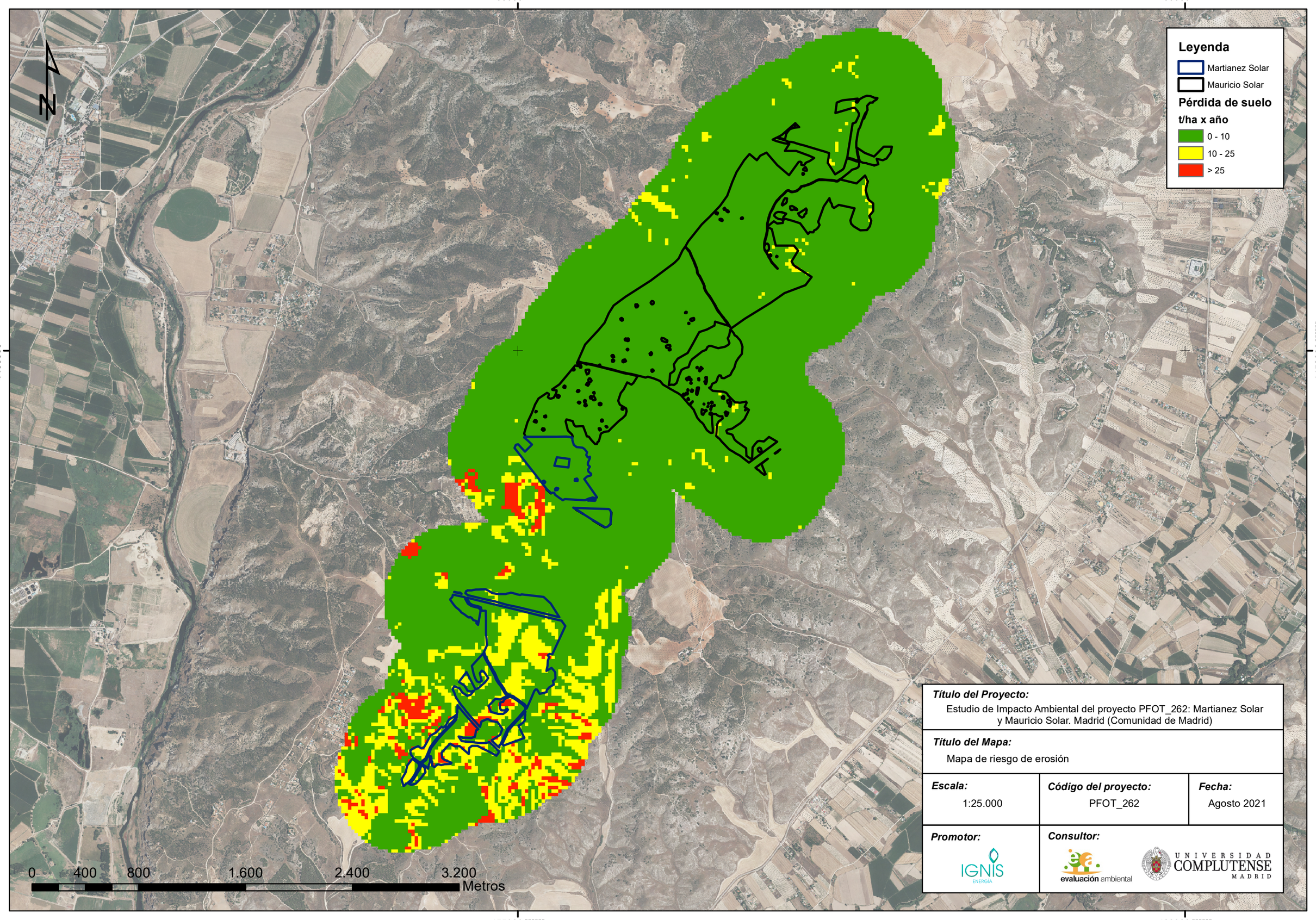
460000.000000

4450000.000000

455000 000000

460000 000000

4450000 000000



Título del Proyecto:
Estudio de Impacto Ambiental del proyecto PFOT_262: Martianez Solar y Mauricio Solar. Madrid (Comunidad de Madrid)

Título del Mapa:
Mapa de riesgo de erosión

Escala:	***Código del proyecto:***	***Fecha:***
1:25.000	PFOT_262	Agosto 2021

Promotor: IGNIS ENERGÍA

Consultor: evaluación ambiental — UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

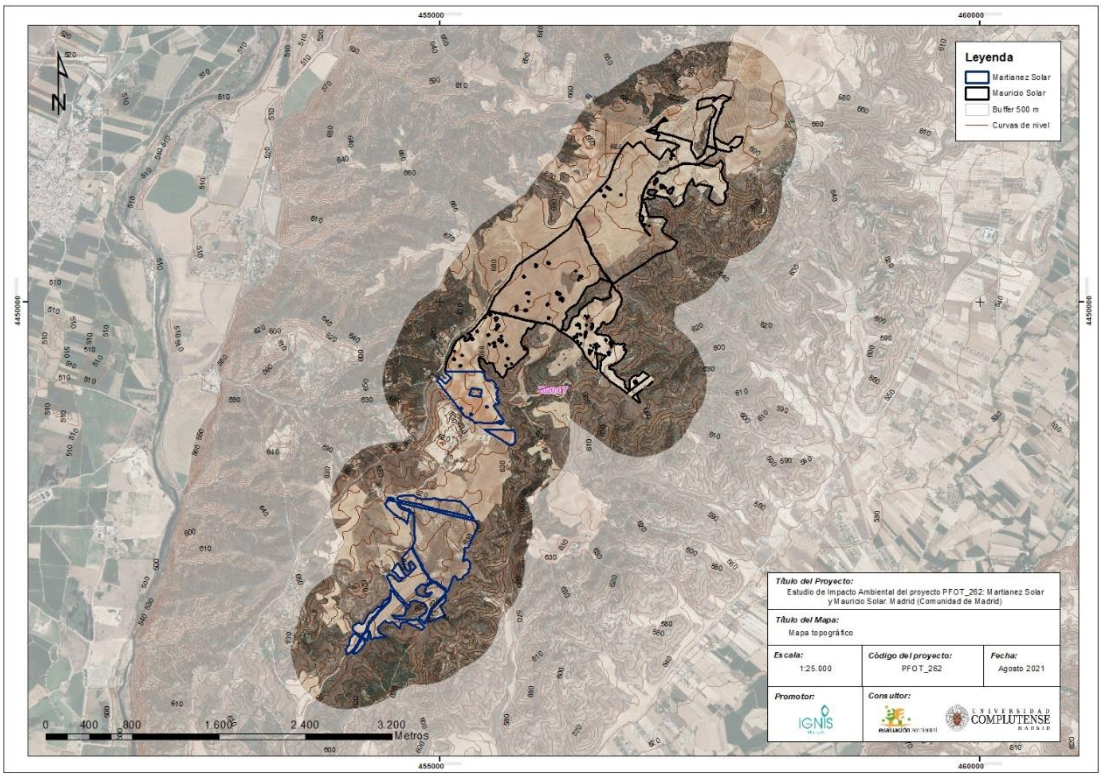
455000 000000

460000 000000



Apéndice 2. Anexo fotográfico

Anexo fotográfico. Visita de campo PFOT 262.



Índice del contenido

Figura 1. Vista del solar "*Mauricio Solar*". Uso del suelo: cultivo de secano. 1

Figura 2. Vista del solar "*Mauricio Solar*" con pequeñas ondulaciones. Uso del suelo: Cultivo agrícola. Manchas de *Quercus ilex* al fondo del terreno. 2

Figura 3. Punto de toma de muestra del solar "*Mauricio Solar*" en conglomerados. 3

Figura 4. Detalle de la erosión por refracción vista en el solar "*Mauricio Solar*" en las calizas.... 4

Figura 5. Detalle de la valla perimetral del solar "Martianez Solar" debido a los cotos de caza privados 5

Figura 1. Vista del solar "*Mauricio Solar*". Uso del suelo: cultivo de secano.



Figura 2. Vista del solar "*Mauricio Solar*" con pequeñas ondulaciones. Uso del suelo: Cultivo agrícola. Manchas de *Quercus ilex* al fondo del terreno.



Figura 3. Punto de toma de muestra del solar "*Mauricio Solar*" en conglomerados.



Figura 4. Detalle de la erosión por refracción vista en el solar "*Mauricio Solar*" en las calizas.



Figura 5. Detalle de la valla perimetral del solar "*Martianez Solar*" debido a los cotos de caza privados

