

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Desarrollo y evaluación de un sistema para la caracterización de microplásticos mediante el uso de imágenes hiperespectrales.

AUTOR/A: Álvaro López Bleda

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

DIRECTOR/A: Gonzalo Rosa Olmeda

TUTOR/A: Miguel Chavarrías Lapastora

DEPARTAMENTO: Departamento de Ingeniería Telemática y Electrónica

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: Luis Arriero Encinas

TUTOR/A: Miguel Chavarrías Lapastora

SECRETARIO/A: Jaime Sancho Aragón

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,

Resumen

En este Proyecto de Fin de Grado, titulado «Desarrollo y evaluación de un sistema para la caracterización de microplásticos mediante el uso de imágenes hiperespectrales», se propone comprobar la viabilidad de detección de microplásticos en medio seco y acuoso observando su respuesta en transmitancia y reflectancia mediante el análisis del espectro electromagnético en el rango infrarrojo cercano (NIR) con la ayuda de una cámara hiperespectral, cuya tecnología se basa en la detección de la capacidad de un material de absorber o transmitir energía en un rango de longitudes de onda concretas.

Se estima que desde 1950 el ser humano ha producido más de 9.000 millones de toneladas métricas de plástico; solo el 9 % de este plástico se ha reciclado adecuadamente, provocando gran cantidad de desechos esparcidos por el mundo. Estos desechos acaban siendo degradados y transformados en microplásticos, partículas menores a los 5 mm generados por la acción de diversos agentes (humanos o naturales). La dispersión de estas partículas está contaminando suelos y grandes masas de agua, suponiendo un grave problema ecológico y de salud pública.

Por ello, es necesario el uso de nuevas tecnologías para realizar una detección de este contaminante y posteriormente una retirada para su correcto reciclado. Este PFG se centra en la detección de microplásticos mediante el uso de una cámara hiperespectral en medio seco y acuoso.

Los experimentos realizados en este PFG han permitido, en primera instancia, obtener las firmas espectrales características de una serie de tipos de plásticos seleccionados, realizando una comparación con las del estado del arte, verificando así el correcto funcionamiento del sistema de captura desarrollado. Una vez verificado, se generaron microplásticos a partir de los plásticos suministrados y se procedió a realizar un estudio de estas partículas menores. En esta última fase del proyecto se comprobó la viabilidad del sistema para detectar MP en medio seco. Sin embargo, se observó que en medio acuoso la acción del agua dificulta la detección de partículas menores al milímetro de diámetro.

Abstract

In this bachelor's thesis, entitled «Development and evaluation of a system for the characterization of microplastics using hyperspectral imaging», we propose to test the feasibility of detecting microplastics in dry and aqueous media by observing their transmittance and reflectance response through the analysis of the electromagnetic spectrum in the near-infrared range (NIR) with the help of a hyperspectral camera, whose technology is based on the detection of the ability of a material to absorb or transmit energy in a range of specific wavelengths.

It is estimated that since 1950, humans have produced more than 9 billion metric tons of plastic; only 9% of this plastic has been properly recycled, resulting in a large amount of waste strewn around the world. This waste ends up being degraded and transformed into microplastics, particles smaller than 5 mm generated by the action of various agents (human or natural). The dispersion of these particles is contaminating soils and large bodies of water, posing a serious ecological and public health problem.

Therefore, it is necessary to use new technologies to detect this pollutant and subsequently remove it for proper recycling. This thesis focuses on the detection of microplastics using a hyperspectral camera in dry and aqueous media.

The experiments carried out in this thesis have allowed, in the first instance, to obtain the characteristic spectral signatures of a series of selected types of plastics, making a comparison with those of the state of the art, thus verifying the correct operation of the developed capture system. Once verified, microplastics were generated from the plastics supplied and a study of these smaller particles was carried out. In this last phase of the project, the viability of the system for detecting MP in dry media was verified. However, it was observed that in aqueous media the action of water hinders the detection of particles smaller than a millimeter in diameter.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Marco y motivación del Proyecto Fin de Grado	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura de la memoria	2
2. Marco Tecnológico	5
2.1. Microplásticos	5
2.1.1. Definición	5
2.1.2. Peligros	6
2.1.3. Detección	6
2.2. Imagen hiperespectral	7
2.3. Cámaras hiperespectrales	8
2.3.1. Tipos de cámaras hiperespectrales	8
2.4. Obtención de huellas espectrales de microplásticos	10
2.4.1. Obtención de las muestras de microplásticos	10
2.4.2. Caracterización de microplásticos mediante imagen hiperespectral	12
3. Especificaciones y restricciones de diseño	15
3.1. Especificaciones	15
3.2. Restricciones	15
4. Descripción de la solución propuesta	19
4.1. Metodología diseñada	19
4.2. Métodos y materiales	20
4.3. Descripción del código	23
4.4. Estudio del tiempo de exposición óptimo	24

4.5. Obtención de la firma de los plásticos a estudiar.	27
4.6. Obtención de microplásticos	28
4.7. Caracterización de la placa de pocillos	29
4.8. Caracterización de microplásticos en medio seco	30
4.9. Caracterización de microplásticos en medio acuoso	31
5. Resultados	33
5.1. Caracterización de plásticos	33
5.1.1. Polietileno	34
5.1.2. Polipropileno	34
5.1.3. Poliestireno	35
5.1.4. Policloruro de vinilo	35
5.1.5. Poliestireno expandido	36
5.1.6. Espuma de polietileno	36
5.1.7. Etileno propileno dieno de tipo M	37
5.2. Caracterización de microplásticos en seco	37
5.3. Caracterización de microplásticos en medio acuoso	39
6. Presupuesto	43
7. Impacto del proyecto	45
8. Conclusiones	47
8.1. Conclusiones	47
8.2. Líneas de trabajo futuras	48
Anexo	49
1. Firmas caracterización de plásticos	49
2. Firmas detección microplásticos en seco	51
3. Firmas detección microplásticos en acuoso	53

Índice de figuras

2.1. Espectro electromagnético (400 - 25000 nm) [5].	6
2.2. Cubo hiperspectral [5].	8
2.3. Tipos de cámaras hiperspectrales según recolección de datos [5].	10
2.4. Red de plancton [14].	11
2.5. Distribución captura imagen hiperspectral [2].	13
2.6. Distribución captura imagen hiperspectral [3].	13
3.1. Sistema de posicionamiento de cámaras y aislamiento, conocido como <i>el cubo</i> . ^{en} uno de los laboratorios del CITSEM.	17
3.2. Cámara SWIR 640 fijada a la estructura móvil en el interior del cubo.	17
3.3. Difusor y fuente de luz reflectancia Photonics Headwall 1004A-21519 [20].	17
3.4. Fuente de luz transmitancia PROVIX LS250 ML02311411 [21].	17
3.5. Placa de 96 pocillos [22].	18
4.1. Diagrama de bloques representando la metodología en cascada a seguir durante el proyecto.	19
4.2. Interfaz de control del cubo y cámara SWIR 640.	20
4.3. Ventana emergente movimiento del brazo móvil.	21
4.4. Ventana emergente ajustes de la cámara hiperspectral.	21
4.5. Firma fuente de alimentación en reflectancia Headwall Photonics.	22
4.6. Firma fuente de alimentación en transmitancia PROVIX LS250.	23
4.7. Polímero de referencia "Zenith Polymer" del fabricante Sphere Optics.	25
4.8. Comparación de la firma espectral del polímero de referencia entre la captura de laboratorio y el fabricante.	26
4.9. Montaje para capturar el balance de blancos en reflectancia.	28
4.10. Montaje para capturar la muestra de polipropileno azul.	28

4.11. Vista lupa binocular con guía.	29
4.12. Vista microplástico de 0.5 mm de diámetro usando lupa binocular.	29
4.13. Placas de pocillos con los microplásticos generados.	29
4.14. Placas de pocillos con impresión 3D para evitar reflejos.	30
4.15. Caracterización de la placa de pocillos en medio seco y acuoso.	30
5.1. Firma espectral polietileno de referencia [4].	34
5.2. Firma espectral polietileno obtenida en el laboratorio.	34
5.3. Firma espectral polipropileno de referencia [23].	34
5.4. Firma espectral de polipropileno obtenida en el laboratorio.	34
5.5. Firma espectral poliestileno estado del arte [23].	35
5.6. Firma espectral de poliestileno obtenida en el laboratorio.	35
5.7. Firma espectral PVC de referencia [24].	35
5.8. Firma espectral de PVC obtenida en el laboratorio.	35
5.9. Firma espectral de PX obtenida en el laboratorio.	36
5.10. Firma espectral de derivados de PE de referencia [23].	36
5.11. Firma espectral de espuma de polietileno obtenida en el laboratorio.	36
5.12. Firma espectral de EPDM obtenida en el laboratorio.	37
5.13. Firmas espectrales MP PE rojo en seco.	38
5.14. Firmas espectrales PS blanco en medio seco.	39
5.15. Firmas espectrales PS blanco en medio acuoso.	39
5.16. Firmas de tres microplásticos próximos en el mismo pocillo.	40
5.17. Firmas de tres microplásticos sin estar en contacto en el mismo pocillo.	41
7.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible de este Proyecto [26].	46
A.1. Firma espectral EPDM blanco.	49
A.2. Firma espectral EPDM negro.	49
A.3. Firma espectral espuma polietileno azul.	49
A.4. Firma espectral espuma polietileno gris.	49

A.5. Firma espectral PE transparente.	50
A.6. Firma espectral PE rojo.	50
A.7. Firma espectral poliespan amarillo.	50
A.8. Firma espectral poliespan blanco.	50
A.9. Firma espectral PP rojo.	50
A.10. Firma espectral PP transparente.	50
A.11. Firma espectral PS rojo.	51
A.12. Firma espectral PS transparente.	51
A.13. Firma espectral PVC rojo.	51
A.14. Firma espectral PVC transparente.	51
A.15. Firmas espectrales EPDM blanco en seco.	51
A.16. Firmas espectrales EPDM negro en seco.	51
A.17. Firmas espectrales espuma polietileno azul en seco.	52
A.18. Firmas espectrales espuma polietileno gris en seco.	52
A.19. Firmas espectrales PE transparente en seco.	52
A.20. Firmas espectrales PE rojo en seco.	52
A.21. Firmas espectrales poliespan amarillo en seco.	52
A.22. Firmas espectrales poliespan blanco en seco.	52
A.23. Firmas espectrales PP rojo en seco.	53
A.24. Firmas espectrales PP transparente en seco.	53
A.25. Firmas espectrales PS rojo en seco.	53
A.26. Firmas espectrales PS transparente en seco.	53
A.27. Firmas espectrales PVC rojo en seco.	53
A.28. Firmas espectrales PVC transparente en seco.	53
A.29. Firmas espectrales EPDM blanco en acuoso.	54
A.30. Firmas espectrales EPDM negro en acuoso.	54
A.31. Firmas espectrales espuma polietileno azul en acuoso.	54
A.32. Firmas espectrales espuma polietileno gris en acuoso.	54

A.33.Firmas espectrales PE transparente en acuoso.	54
A.34.Firmas espectrales PE rojo en acuoso.	54
A.35.Firmas espectrales poliespan amarillo en acuoso.	55
A.36.Firmas espectrales poliespan blanco en acuoso.	55
A.37.Firmas espectrales PP rojo en acuoso.	55
A.38.Firmas espectrales PP transparente en acuoso.	55
A.39.Firmas espectrales PS rojo en acuoso.	55
A.40.Firmas espectrales PS transparente en acuoso.	55
A.41.Firmas espectrales PVC rojo en acuoso.	56
A.42.Firmas espectrales PVC transparente en acuoso.	56

Índice de tablas

6.1. Coste del personal del proyecto.	43
6.2. Coste de materiales del proyecto.	43
6.3. Coste del software del proyecto.	43
6.4. Coste total del proyecto.	44

Lista de Acrónimos

- CITSEM** Centro de Investigación en Tecnologías Software y Sistemas Multimedia para la Sostenibilidad. VII, XII, 1, 7, 15–17, 20, 24, 29, 48
- ENVI** Formato cuya abreviación significa Entorno para Visualizar imágenes. XII, 23
- EPDM** Etileno Propileno Dieno tipo M. XII, 37, 47
- FTIR** Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier. XII, 6, 7, 10
- GDEM** Grupo de Diseño Electrónico y Microelectrónico. XII, 1, 2, 20
- HSI** HyperSpectral Image o HyperSpectral Imaging. XII, 6, 7, 47
- mm** Milímetros. I, III, XII, 5, 40
- MP** Microplásticos. I, III, VIII, XII, 2, 5–7, 10–12, 19, 22, 25, 28–31, 33, 37–41, 45, 48
- NIR** Near-Infrared. I, III, XII, 2, 5, 12, 13, 22, 26
- nm** Nanómetros. XII, 48
- PE** Polietileno. XII, 31, 34, 36, 39, 40
- PFG** Proyecto Fin de Grado. I, XII, 5–7, 19, 45
- PP** Polipropileno. XII, 34
- PS** Poliestileno. XII, 29, 31, 40, 41
- PVC** Policloruro de vinilo. XII, 6, 31, 35, 40
- PX** Poliestireno expandido / Poliespan. XII, 36
- RGB** Red, Green and Blue. XII, 1
- UPM** Universidad Politécnica de Madrid. XII, 1

Capítulo 1

Introducción

1.1. Marco y motivación del Proyecto Fin de Grado

Este Proyecto Fin de Grado ha sido desarrollado en el Grupo de Diseño Electrónico y Microelectrónico (GDEM), perteneciente al Centro de Investigación en Tecnologías Software y Sistemas Multimedia para la Sostenibilidad (CITSEM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Como ya ha sido mencionado en el Resumen de este Proyecto, se estima que el ser humano ha producido más de 9.000 millones de toneladas métricas de plástico de las cuales solo el 9% ha sido reciclado adecuadamente. Esto está provocado una contaminación masiva del medio por los microplásticos surgidos de la degradación de plásticos.

En el contexto de esta crisis medioambiental, el GDEM dispone de una línea de investigación entre cuyas tareas destaca el interés en la detección y caracterización de microplásticos mediante distintos tipos de cámaras, técnicas de procesado de imagen y aprendizaje máquina. La experiencia del grupo en este marco se resume en los siguientes puntos:

- Desarrollo de prototipos y sistemas de captura de imágenes de distinto tipo (RGB, hiperespectral, profundidad, etc.).
- Adecuación de sistemas de captura a diversos entornos de trabajo.
- Desarrollo de algoritmos de procesado de información proveniente de sistemas de captura de imágenes.
- Capacidad de adquirir información a partir del procesado de las imágenes adquiridas.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el de comprobar la viabilidad de desarrollar un sistema, basado en la experiencia del GDEM en procesado de imágenes, capaz de detectar y caracterizar microplásticos apoyándose en el uso de una cámara hiperespectral para observar su respuesta en transmitancia y/o reflectancia mediante el análisis del espectro electromagnético en el rango infrarrojo cercano (NIR).

Para el cumplimiento de este objetivo, se plantean los siguientes objetivos asociados:

- Obtención y posterior comparativa de las firmas espectrales de un número significativo de plásticos a partir del sistema diseñado en el laboratorio y plásticos categorizados en el estado del arte.
- Detección y categorización de MP en medio seco y acuoso utilizando el sistema anteriormente utilizado.

Para cumplir estos objetivos se ha seguido la siguiente metodología de trabajo en cascada:

1. Revisión del estado del arte respecto a la detección de MP y uso de imagen hiperespectral.
2. Adaptación al caso de uso del PFG del sistema de captura disponible en el CITSEM.
3. Calibración de la cámara hiperespectral.
4. Diseño e implementación de un programa en Python utilizado para detectar MP.
5. Obtención y clasificación de muestras de MP a estudiar.
6. Caracterización de los plásticos adquiridos.
7. Detección y caracterización de MP en medio seco.
8. Detección y caracterización de MP en medio acuoso.
9. Análisis de los resultados obtenidos.

1.3. Estructura de la memoria

Esta memoria está dividida en 8 capítulos.

En el Capítulo 1 se introduce el proyecto, su motivación y se revisan los objetivos propuestos.

En el Capítulo 2 se describe el marco tecnológico. Se comienza explicando qué son los microplásticos y la problemática que puede ocasionar su contaminación. Se continúa hablando sobre

diferentes técnicas de detección y se presenta el concepto de imagen hiperespectral, en el que se apoya este PFG para caracterizar y detectar microplásticos.

En el Capítulo 3 se enumeran las especificaciones del proyecto y las restricciones para el diseño de la solución planteada.

En el Capítulo 4 se detallan los pasos seguidos para dar solución a los objetivos planteados. Se comienza configurando la cámara a utilizar y se termina realizando detección de microplásticos.

En el Capítulo 5 se presentan y analizan los resultados obtenidos en los experimentos realizados.

En el Capítulo 6 se realiza un desglose de los gastos incurridos durante el proyecto.

En el Capítulo 7 se contextualiza el proyecto dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En el Capítulo 8 se realiza una valoración final, se presentan las conclusiones del trabajo y se marcan unas posibles líneas futuras a seguir.

Capítulo 2

Marco Tecnológico

En este capítulo se presentan los conceptos básicos para poder contextualizar este PFG. En el primer apartado se describe qué son los MP, los problemas que existen para su percepción y técnicas para su detección, así como posibles problemas derivados de su aparición en el mundo moderno. En el segundo apartado de este capítulo, se explica qué son las cámaras hiperspectrales, así como las imágenes que se obtienen con dichas cámaras. Por último se habla de diferentes técnicas de obtención de muestras de materiales y la consiguiente preparación para su estudio.

2.1. Microplásticos

2.1.1. Definición

Los MP son partículas generadas a partir de plásticos cuyo diámetro es menor a 5 mm [1]. Estos MP surgen por la degradación debida tanto al medio ambiente (microorganismos, viento, etc.), como por el uso cotidiano de plásticos por parte del ser humano (uso de lavadoras, uso de tablas de cortar de plástico en vez de madera, degradación de neumáticos por el uso de vehículos, etc.). El reducido tamaño de los MP provoca que sean difícilmente detectables por el ojo humano a simple vista y, si este agente externo fuera transparente y se encontrara en un medio acuoso, habría dificultades incluso usando una lupa de laboratorio. Para facilitar su detección, podemos apoyarnos en la caracterización espectral de los MP.

Como se ha podido corroborar en diversos estudios [2] [3] [4], los MP presentan particularidades específicas a la hora de reflejar y transmitir luz en un rango concreto del espectro electromagnético. Este rango se encuentra dentro del infrarrojo cercano (NIR), en concreto estas particularidades mencionadas se aprecian entre los 900 y los 1700 nm del espectro electromagnético, representado en la Figura 2.1.

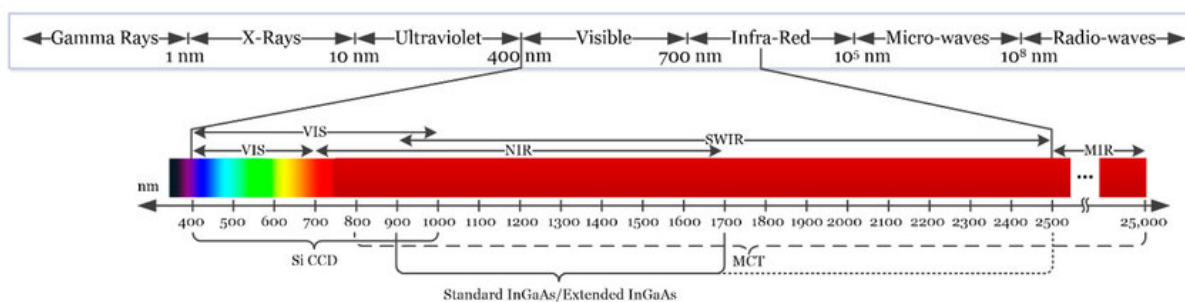


Figura 2.1. Espectro electromagnético (400 - 25000 nm) [5].

2.1.2. Peligros

Como se ha señalado, los MP son un agente externo difícilmente detectable y cuyo número va en aumento constante. Esto está provocando que se encuentren muestras de forma generalizada tanto en la comida como en las fuentes de agua utilizadas por el ser humano y en grandes concentraciones de agua dulce y salada. La contaminación del agua potable por este agente externo, según un estudio realizado por *Orb Media* [6], ha llegado al 83 % de las muestras de agua analizadas, por lo que es necesario comprobar si los MP son perjudiciales para la salud. En la fecha de redacción de este PFG, no se ha llegado a un consenso científico a este respecto; sin embargo, algunos investigadores y estudios señalan que existen motivos para la preocupación. En un artículo publicado por la revista *National Geographic* [7], se señala que estas partículas provocan irritación pulmonar, mareos y dolores de cabeza, pero que para poder afirmar si pueden llegar a provocar enfermedades tales como el cáncer o el asma, necesitaremos tiempo y un mayor número de estudios.

En un artículo publicado por la revista *Toxicological Sciences* dirigido por el profesor *Xiaozhong Yu*, se ha realizado un análisis de testículos de 23 humanos y de 47 perros castrados para comprobar la cantidad de MP presentes y cómo puede afectar a la fertilidad. A lo largo de este artículo se detalla que se encontraron 3 veces más concentración de MP en los testículos humanos, lo que indica que los seres humanos estamos más expuestos a la contaminación de este agente externo. Por último, en los testículos de los perros se comprobó el recuento de espermatozoides, comprobándose que, en aquellos con altas concentraciones de PVC, la cantidad de espermatozoides disminuía, lo que sugiere que los MP pueden tener consecuencias en el grado de fertilidad [8].

2.1.3. Detección

Para detectar MP de forma eficaz es necesario dejar a un lado la inspección visual del medio a estudiar y recurrir a métodos que consiguen una detección eficaz de partículas imperceptibles, estas técnicas son la espectroscopía Raman, infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) e imagen hiperespectral (HSI).

En este proyecto se utilizan imágenes hiperespectrales para caracterizar y detectar diferentes tipos de MP de diferentes colores y opacidades, ya que dentro del CITSEM, centro donde se ha desarrollado este PFG, se dispone de una cámara hiperespectral (Headwall SWIR 640) sobre la que se profundizará mas adelante, que cumple con las necesidades de este estudio a realizar. A su vez el uso de HSI permite una obtención de huellas espectrales con una reducción significativa de tiempo de captura de datos y la posibilidad de estudio de superficies de mayor tamaño, comparado con Raman y FTIR.

La espectroscopía Raman es una técnica de análisis basada en la dispersión y en los cambios sufridos en la frecuencia de los rayos de luz provocados por el contacto con la muestra a estudiar. Esta técnica no requiere de una preparación previa del objeto a estudiar y es afectada en baja medida por la acción de la gúa, lo que la hace una buena candidata para la detección de MP en medio acuoso [9].

FTIR se basa en la absorción de la muestra de la radiación infrarroja, la radiación transmitida por esta llega al detector de espectro, donde se trata la señal recibida con la transformada de Fourier, obteniendo así la huella espectral del objeto a estudiar. Al existir para FTIR cuatro técnicas diferentes de estudios de muestras, es necesaria una preparación previa del objeto a estudiar para asegurar la correcta detección y caracterización de este [10].

2.2. Imagen hiperespectral

Una imagen hiperespectral es aquella que contiene información de al menos 100 bandas diferentes del espectro electromagnético por cada píxel capturado. Los sensores HSI generan datos en 3 dimensiones, formando lo que se conoce como cubo hiperespectral, donde las dos primeras dimensiones corresponden a la ubicación espacial del píxel concreto de la fotografía y la tercera dimensión corresponde a la información espectral asociada a cada píxel [5]. Se puede observar una representación gráfica del cubo hiperespectral en la Figura 2.2 donde el eje x y el eje y aportan información espacial del píxel al que se apunta, mientras que el llamado eje λ recoge la información espectral de un píxel concreto. De esta forma se puede obtener la huella espectral de un píxel concreto fijando un valor de x e y y recorriendo los valores del eje λ tal y como se ve en la gráfica llamada *Single Pixel Spectral Signature* de la Figura 2.2. Esta tecnología se utiliza con éxito en campos diversos como la medicina, minería, biología, industria, investigación forense y, como es en el caso de este proyecto, la detección de MP [11].

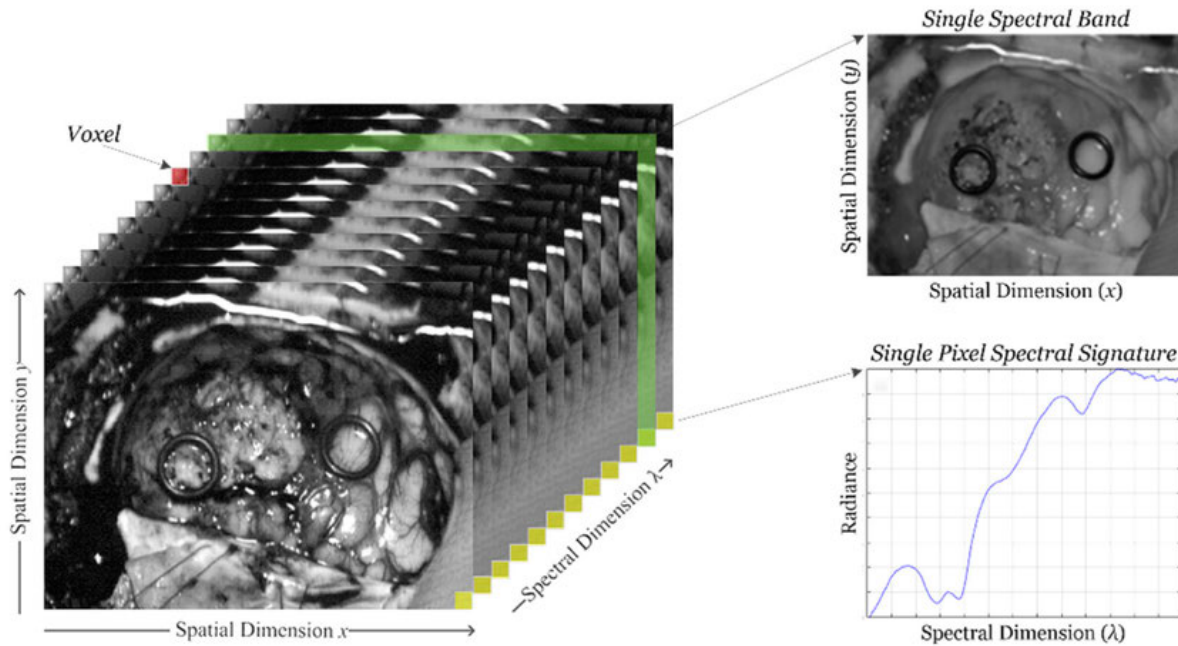


Figura 2.2. Cubo hiperspectral [5].

2.3. Cámaras hiperespectrales

Las cámaras hiperespectrales son aquellas cámaras capacitadas para obtener una imagen hiperespectral. Estos datos hiperespectrales se obtienen gracias a que están dotadas de un sensor que permite la recolección de información espectral.

2.3.1. Tipos de cámaras hiperespectrales

Las cámaras hiperespectrales se pueden dividir en 4 tipos según la tecnología usada para recolectar el cubo hiperspectral: cámaras *point-scan* (*whiskbroom*), *wavelength-scan/area-scan*, *snapshot* y *line-scan* (*pushbroom*) [5].

Las cámaras *point-scan*, Figura 2.3 a), recogen toda la información espectral de un solo píxel, por lo que, para poder obtener una imagen hiperespectral completa de un área concreta, es preciso realizar un recorrido en los ejes x e y que permita fotografiar cada píxel del objeto o muestra a estudiar. Dado que es necesario realizar este movimiento con la cámara o con la muestra a capturar, se consume una gran cantidad de tiempo y es altamente propenso a fallos, al tener que capturar cada píxel por separado. Sin embargo, la gran ventaja que tienen este tipo de cámaras es la alta resolución espectral de cada píxel capturado, por lo que se obtienen datos mucho más precisos que en otros tipos de cámaras hiperespectrales [5].

Las cámaras *line-scan*, Figura 2.3 b), capturan la totalidad de las bandas del espectro electromagnético disponibles para la cámara, pero sacrifican un eje del espacio, lo que provoca que tan

solo pueda capturar una línea de información espacial. Por este motivo, estas cámaras requieren de movimiento continuo por parte del objeto a fotografiar o de la propia cámara que captura la imagen deseada. Gracias a este movimiento continuo durante la captura, se puede reconstruir la imagen a estudiar. Al sacrificar un eje espacial y favoreciendo la captura de información del eje λ de la Figura 2.2 se consigue una alta resolución espacial y espectral y una gran versatilidad, ya que se pueden utilizar tanto para escanear objetos en movimientos como objetivos estáticos [5].

Las cámaras *wavelength-scan*, Figura 2.3 c), capturan la información espacial completa de una imagen, pero tan solo de una banda del espectro electromagnético por captura, por lo que, para obtener la huella espectral del objetivo a estudiar es necesario cambiar los filtros de la cámara para cambiar la longitud de onda de la que se obtiene información, toda esta información recopilada se procesa en un ordenador para formar el cubo hiperespectral final. Dada la necesidad de cambiar de filtro, el tiempo de obtención de un cubo hiperespectral es muy alto comparado con las cámaras *line-scan*. Al usar este tipo de cámaras no es necesario el movimiento de la muestra ni de la cámara para captar toda la escena, pero, se sacrifican tiempo y recursos para capturar la totalidad del cubo hiperespectral [12].

Las cámaras *snapshot*, Figura 2.3 d), con una sola fotografía capturan la totalidad espacial de la imagen y un rango de bandas del espectro electromagnético concreto. Al realizar una captura que recoge toda la información, obtenemos una menor resolución espectral y espacial del objeto a estudiar, pero la información completa se obtiene al momento, por lo que el tiempo de obtención del cubo hiperespectral es el más corto entre los tipos de cámaras hiperespectrales. Gracias a la obtención instantánea del cubo, estas cámaras se pueden utilizar para estudiar objetos en movimiento y a tiempo real [5].

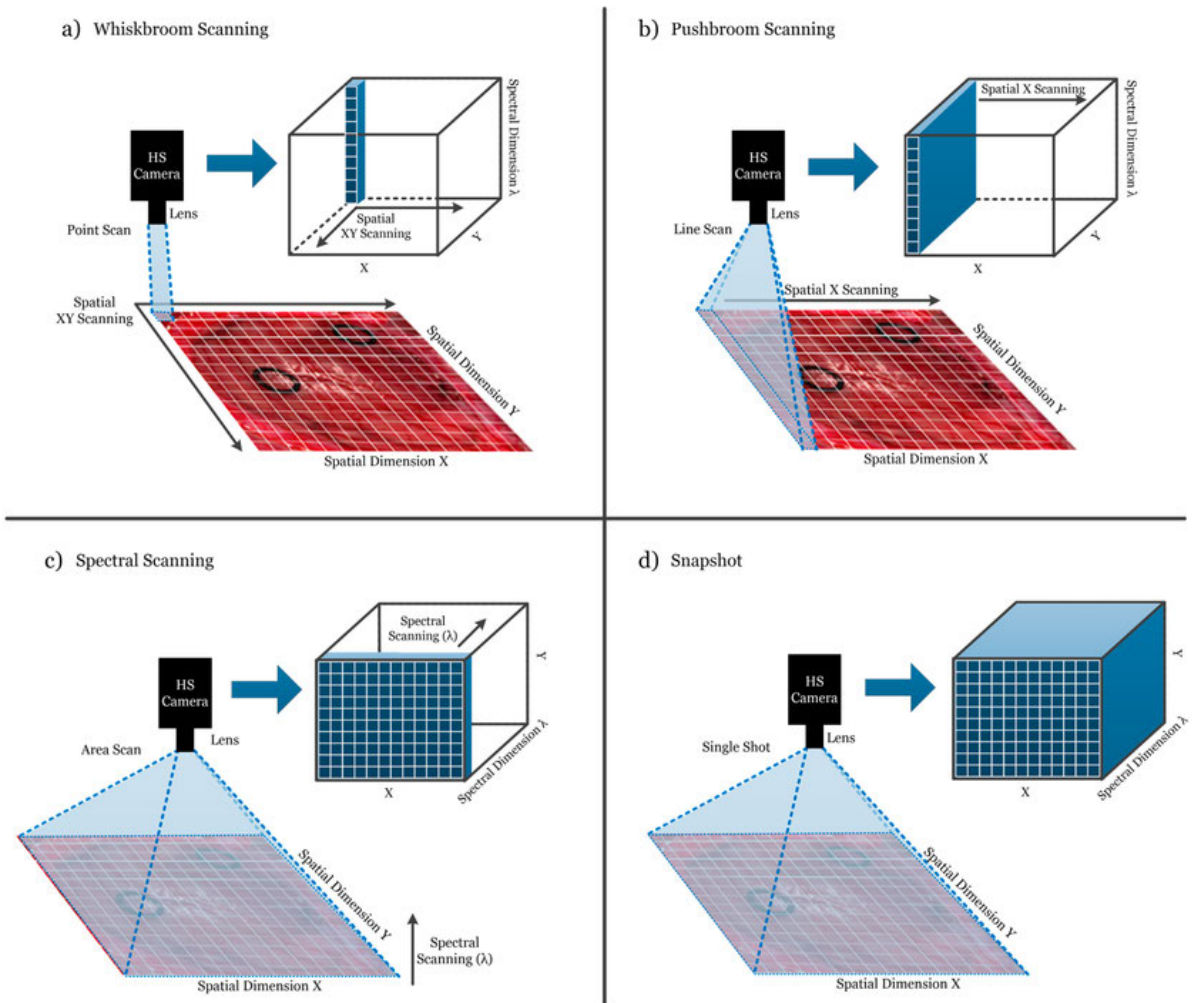


Figura 2.3. Tipos de cámaras hiperespectrales según recolección de datos [5].

2.4. Obtención de huellas espectrales de microplásticos

La investigación de microplásticos comenzó con la recolección y clasificación en laboratorio mediante observación a simple vista. Más adelante se comienza a usar espectroscopía Raman y FTIR para conseguir cuantificar MP no detectables a simple vista. En la actualidad, a parte de estas dos técnicas, se encuentra en desarrollo el uso de cámaras hiperespectrales para detectar este agente externo en diferentes medios.

2.4.1. Obtención de las muestras de microplásticos

Para el estudio de MP en laboratorio, se pueden obtener muestras que provengan de medios acuosos, terrestres y generadas en laboratorio. Para comprender su distribución en los diferentes medios es importante que se realicen estudios en diferentes entornos, lo que precisa de diferentes

técnicas para su obtención para su posterior categorización.

La obtención de MP en medio acuoso se puede realizar mediante la recolección directa de las muestras de agua de mar, filtrando en el lugar de la recolección y llevando al laboratorio las muestras obtenidas, una vez en el laboratorio se limpia con etanol todas las herramientas a usar para su manipulación y así evitar contaminaciones externas [13]. Otra forma de recolección de MP es el uso de redes de recolección de plancton mostradas en la Figura 2.4, ya que tienen tamaños de malla menores a los 200 micrómetros, por lo que son capaces de retener MP sin ningún tipo de problema [14], una vez realizada la recolección de muestras, se siguen pasos similares que en el método anterior, las muestras de MP son transportadas al laboratorio, donde se tratan para evitar la acción de agentes externos y facilitar su posterior estudio y caracterizado [15].

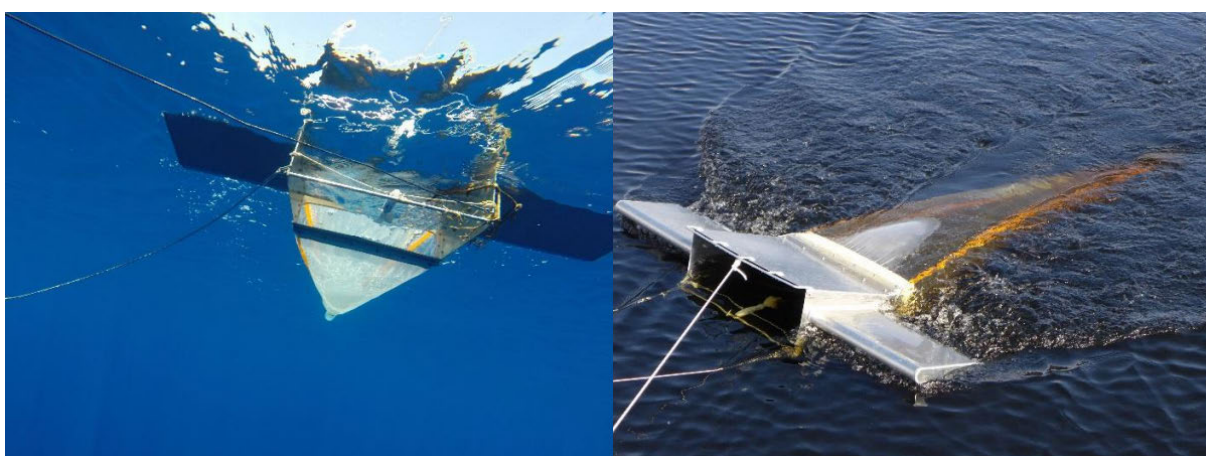


Figura 2.4. Red de plancton [14].

En medio terrestre, la forma más común de obtención de MP es el filtrado de muestras de arena de playas, ríos y lagos, al ser estas partículas transportadas por medio acuoso, gran parte de estos sedimentos acaban en tierra firme, dando lugar a altas acumulaciones de MP, según el estudio *Microplastic in global and Norwegian marine environments: Distributions, degradation mechanisms and transport* [15] en las playas más contaminadas, que suelen encontrarse en lugares con alta densidad de población, se encuentran concentraciones de plástico de hasta un 3% en las muestras adquiridas. Estas recolecciones se filtran en laboratorio y se proceden a caracterizar los MP.

Por último, se pueden obtener MP directamente en laboratorio, se realizan compras de plásticos concretos y se realizan cortes y raspados para obtener partículas menores a los 5 milímetros de diámetro [3], existen estudios donde, para conseguir las partículas más pequeñas, se utilizan molinillos eléctricos[16], llegando a conseguir partículas menores al medio milímetro. Para obtener partículas menores a las 100 micras, en el estudio *Methods for controlled preparation and dosing of microplastic fragments in bioassays* [17] se utiliza un triturador criogénico, que son capaces de conseguir fragmentos que llegan a las 53 micras y, posteriormente, se tratan las muestras con nitrógeno líquido durante 10 minutos para depurar y evitar desperfectos provocados por el

tritador criogénico, este método de obtención de MP es eficaz, pero altamente costoso al tener el triturador un precio mayor a los 10.000€.

2.4.2. Caracterización de microplásticos mediante imagen hiperespectral

Una vez obtenidas las muestras de MP, proceden a ser caracterizadas en laboratorio con la ayuda de una cámara hiperespectral y un ordenador que procese la información capturada, procedimiento comentado en el Apartado 2.4.2.2. Para la detección de MP las cámaras más utilizadas en los estudios comprobados son las *line-scan* y las *snapshot*, siendo las primeras las predominantes, dado que no es complicado realizar un movimiento constante de una agrupación de MP y se consigue una mayor resolución espectral que con las cámaras de tipo *snapshot*.

En este contexto, será necesaria la construcción un sistema de captura donde se encuentre la cámara hiperespectral, un difusor que trabaje en reflexión y/o transmisión, un brazo móvil que se encargue de mover la cámara hiperespectral de tipo *line-scan* o que se encargue de mover la muestra donde se encuentran los MP. Todo este sistema debe estar conectado a un ordenador que coordine el movimiento del brazo y la captura de imagen, además de recopilar la información captada por la cámara hiperespectral. Esta información será tratada por el ordenador, el cual se encargará de formar el cubo hiperespectral que contendrá la información a estudiar, se pueden observar dos diferentes distribuciones de captura usando una cámara hiperespectral de tipo *line-scan* en las Figuras 2.5 y 2.6.

2.4.2.1. Fotografiado de muestras

Para realizar estas fotografías, se preparan las muestras en una base, intentando que esta no interfiera en los datos recogidos por la cámara a la hora de realizar la fotografía, en el estudio *Characterization of microplastics on filter substrates based on hyperspectral imaging: Laboratory assessments* [4] se comprueban un total de 11 bases diferentes sobre la que colocar los MP para comprobar cual de estas sería la base idónea para no recibir grandes interferencias a la hora de capturar la información en reflectancia o transmitancia en el rango 900-1700 nm. En dicho estudio, se llega a la conclusión de que el filtro óptimo para detectar MP en el rango espectral indicado es la membrana de policarbonato revestido de oro, con el que han sido capaces de detectar MP hasta las 100 micras, pero al ser un filtro altamente caro, se comprueban otras 10 bases más accesibles y se llega a la conclusión de que las bases finas, transparentes y de cristal serían las que menos impactan la toma de datos en el rango NIR y que las bases de plásticos transparentes serían aceptables para la detección de MP de tamaños mayores a las 300 micras. Esta detección de MP se verá también afectada dependiendo del tratamiento, color, transparencia y si se encuentra en medio acuoso o no [3].

Estas muestras de MP se colocan sobre el filtro de captura y este filtro se coloca sobre el difusor si se trabaja en transmisión o bajo la luz proporcionada por el difusor si trabaja en reflexión. Las

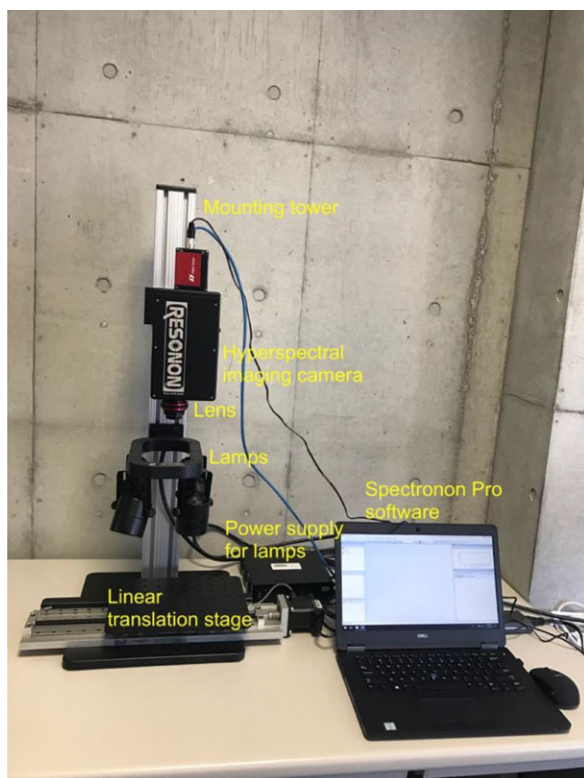


Figura 2.5. Distribución captura imagen hiperespectral [2].



Figura 2.6. Distribución captura imagen hiperespectral [3].

bombillas que se encuentran en el difusor deben trabajar en el rango del espectro electromagnético deseado, ya que si no iluminan en NIR, no habrá energía suficiente en el rango 900 - 1700 nm como para que la señal capturada pueda ser distinguida del ruido captado. El brazo móvil controla el desplazamiento de la base donde se encuentran las muestras o de la propia cámara hiperespectral y, con el movimiento de este brazo, comienza la obtención de la imagen hiperespectral.

2.4.2.2. Procesado de la información

Una vez terminada la captura, el software desarrollado, se encarga de formar el cubo hiperespectral con cada línea de datos obtenida por la cámara hiperespectral. Este cubo obtenido está formado por los datos de energía en cada banda espectral recogidos por la cámara, junto a la información espacial de cada píxel de la imagen. A este cubo espectral se accede mediante un programa que sea capaz de recorrer matrices para obtener los datos de energía del objeto fotografiado.

Esa primera imagen obtenida, es lo que se llama en fotografía una imagen en crudo (*RAW*) y contiene los datos de imagen sin procesar [18], lo que permite un tratamiento posterior, que será necesario para la calibración de la imagen hiperespectral capturada. Esta calibración se realiza para obtener unos resultados que se ajusten a la realidad lo máximo posible, por lo que será

necesario obtener una captura de la máxima energía captada por la cámara en las condiciones del experimento que se esté realizando en ese momento, a la que llamaremos balance de blancos, y una captura de la mínima energía captada por la cámara mediante la colocación de la tapa del objetivo, a la que llamaremos balance de negros. Una vez obtenidos estas dos medidas, se obtiene la imagen calibrada mediante la siguiente fórmula [19]:

$$\text{Imagen calibrada} = \frac{\text{Imagen original} - \text{Balance de negros}}{\text{Balance de blancos} - \text{Balance de negros}}$$

Capítulo 3

Especificaciones y restricciones de diseño

3.1. Especificaciones

Para asegurar un buen funcionamiento del sistema de detección de microplásticos, hay ciertas especificaciones a cumplir:

- El sistema ha de ser capaz de caracterizar y detectar microplásticos mediante el uso de la cámara hiperespectral disponible en el laboratorio del CITSEM mencionada en el Apartado 3.2.
- Comprobación de la correcta caracterización y validación espectral del polímero de referencia que facilita el fabricante.
- El sistema debe identificar 7 tipos diferentes de plásticos, entre ellos se encuentran el EPDM, espuma de polietileno, polietileno, polipropileno, poliestileno, PVC y poliexpán. Se comprobará la firma de estos plásticos con un mínimo de dos muestras de diferente color por cada tipo de polímero, siendo 22 el número total de plásticos a caracterizar.

3.2. Restricciones

Para este proyecto se deben tener en cuenta ciertas restricciones a la hora de abordar el diseño de la solución:

- Se usará la cámara hiperespectral Headwall SWIR 640 (900 - 2500 nm), Figura 3.2, cuyo rango de trabajo entra dentro de los 900 - 1700 nm para caracterización de microplásticos.
- Para realizar el control de la cámara hiperespectral, se manejará el cubo instalado por parte del CITSEM mostrado en la Figura 3.1 donde se encuentra fijada dicha cámara, como se

puede ver en la Figura . El control del cubo se realiza mediante el software del propio CITSEM.

- El sistema operativo donde se va a realizar tanto el control de la cámara como el editor de código será Linux en su distribución Ubuntu.

- Los programas necesarios para el tratamiento de imágenes hiperespectrales se realizarán en el idioma *Python* versión 3, para poder utilizar las librerías creadas con anterioridad por el CITSEM.

- Se utilizará *Visual Studio Code* para escribir el código de los programas a utilizar.

- Las librerías de los programas deben ser de código libre.

- Para trabajar en reflectancia se utilizará la fuente de luz *Photonics Headwall 1004A-21519*, capaz de emitir energía con la suficiente ganancia como para ser distinguida de la señal de ruido hasta los 2100 nm de longitud de onda, Figura 3.3.

- Para trabajar en transmitancia se utilizará la fuente de luz con difusor *PROVIX LS250 ML02311411* con la bombilla *L1090 MR16 w/Aluminum 150W Halogen Lamp de International Light* capaz de emitir energía con la suficiente ganancia como para ser distinguida de la señal de ruido hasta los 1700 nm de longitud de onda 3.4.

- Para realizar las fotografías, los microplásticos se colocarán en una placa de la marca *Thermo Scientific* de poliestireno de 96 pocillos, Figura 3.5.

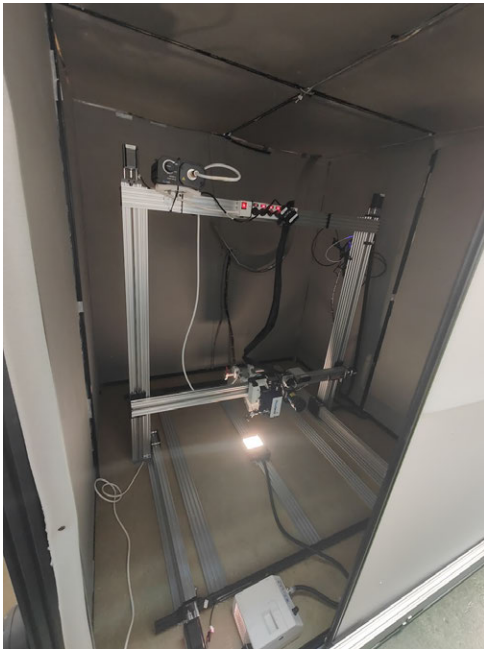


Figura 3.1. Sistema de posicionamiento de cámaras y aislamiento, conocido como 'el cubo', en uno de los laboratorios del CITSEM.



Figura 3.2. Cámara SWIR 640 fijada a la estructura móvil en el interior del cubo.



Figura 3.3. Difusor y fuente de luz reflectancia Photonics Headwall 1004A-21519 [20].



Figura 3.4. Fuente de luz transmitancia PRO-VIX LS250 ML02311411 [21].



Figura 3.5. Placa de 96 pocillos [22].

Capítulo 4

Descripción de la solución propuesta

Este capítulo describe la solución propuesta para dar respuesta a los objetivos planteados para este PFG. Como ya se ha indicado anteriormente, se va a realizar un estudio de MP mediante el uso de imágenes hiperespectrales y, para ello, se va a seguir una metodología de cascada marcada por hitos a conseguir, empezando por comprobar que la cámara toma las imágenes correctamente y terminando con la detección de MP en medio acuoso.

4.1. Metodología diseñada

Para este proyecto se ha elegido una metodología de cascada en la que los hitos a conseguir se encuentran representados en la Figura 4.1. En este diagrama de bloques se puede observar los pasos a seguir durante este proyecto. Primero, mediante el uso del polímero de referencia del fabricante, se elige el tiempo de exposición de la cámara para trabajar con el difusor en transmisión. El siguiente paso es la caracterización de los plásticos que se han elegido para el experimento trabajando en reflexión, ya que, para evitar errores al estudiar MP, se han utilizado muestras grandes de plásticos que no dejan pasar la luz. Una vez caracterizados, se procede a generar MP y categorizar según tamaños. Una vez obtenidos dichos MP se procede a obtener la firma espectral de los MP en seco. Por último, se obtiene la firma de los MP en medio acuoso.

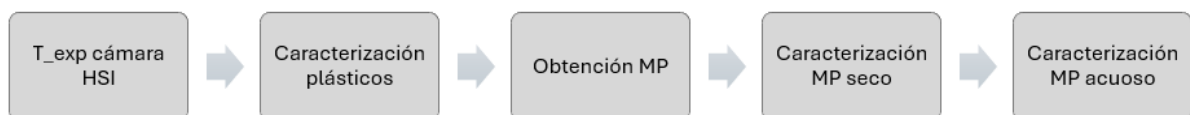


Figura 4.1. Diagrama de bloques representando la metodología en cascada a seguir durante el proyecto.

4.2. Métodos y materiales

Como se ha señalado en el Apartado 3.2, para poder obtener la imagen hiperespectral, se va a utilizar la cámara de tipo *line-scan Headwall Photonics SWIR 640*, por ello se necesita una estructura que permita el movimiento de la cámara para poder realizar una captura completa de los plásticos a estudiar. Para ello el equipo del GDEM ha desarrollado una plataforma robotizada que permite el movimiento de la cámara en 3 ejes llamado "el cubo", que se puede observar en la Figura 3.1. Este sistema se maneja mediante un software facilitado por el CITSEM cuya interfaz se muestra en la Figura 4.2. Dicha interfaz está programada para que, no solo sea capaz de mover el sistema, sino que se encuentra sincronizada con la cámara hiperespectral para capturar *frames* a la vez que se desplaza, formando así la imagen hiperespectral deseada. Esta imagen es la que se procesará mediante un programa escrito en Python, descrito en el Apartado 4.3 para obtener la información espectral del objeto capturado.

El funcionamiento de la interfaz es muy intuitivo, el primer paso es hacer *click* en el botón *HOME* para que la estructura móvil se coloque en su posición inicial donde los tres ejes se encuentran en el valor 0 para realizar la calibración de la posición de este sistema. Lo siguiente que se debe realizar es mover la cámara hasta la posición donde se quiera comenzar la captura de la imagen hiperespectral. Para ello se selecciona el botón *MOVE*, abriéndose una ventana emergente como la mostrada en la Figura 4.3, se selecciona la posición de los tres ejes y comenzará el movimiento hasta las coordenadas seleccionadas.

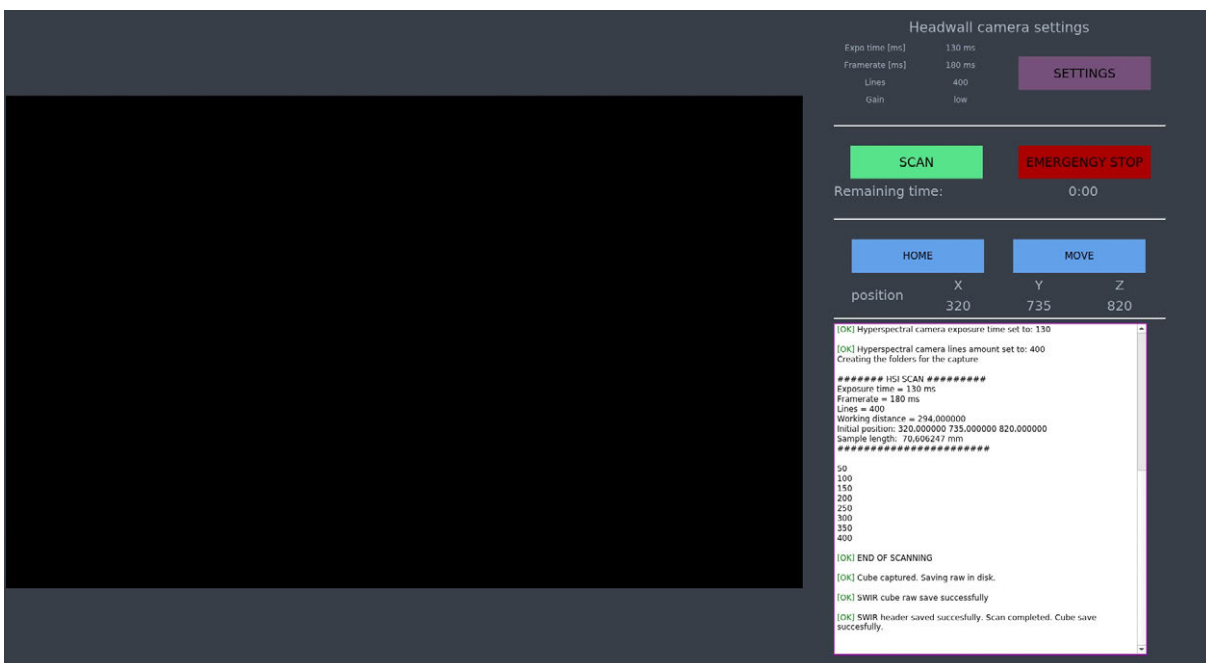


Figura 4.2. Interfaz de control del cubo y cámara SWIR 640.

Cuando la cámara se encuentra en la posición deseada, y antes de comenzar la captura, se debe seleccionar el tiempo de exposición y los fotogramas por segundo de la cámara, para ello se hace



Figura 4.3. Ventana emergente movimiento del brazo móvil.

click al cuadro *SETTINGS*, abriéndose la ventana emergente de la Figura 4.4. En esta ventana se selecciona el tiempo de exposición, las imágenes por segundo y las líneas de captura deseadas desde la posición inicial de la cámara.

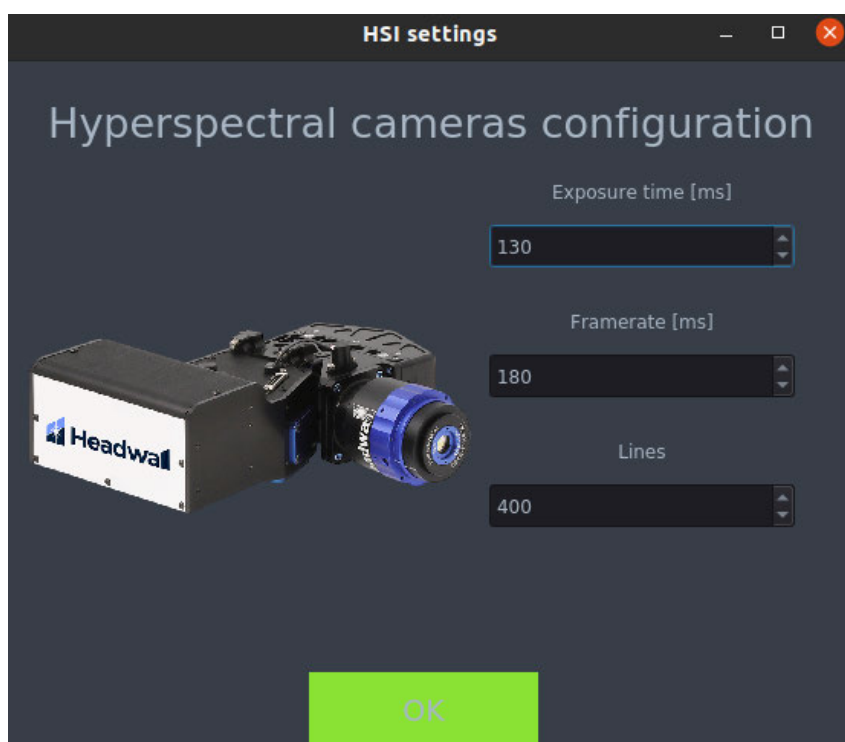


Figura 4.4. Ventana emergente ajustes de la cámara hiperespectral.

Para tener un número de muestras significativas, se han comprado 22 tipos diferentes de plásticos. En total se dispone de 2 tipos de EPDM (blanco y negro), 3 tipos de espuma de polietileno (gris, azul y negro), 6 tipos de polietileno (blanco, blanco transparente, negro, rojo 1, rojo 2 y transparente), 3 tipos de polipropileno (azul, rojo y transparente), 3 tipos de poliestileno

(blanco, rojo y transparente), 3 tipos de PVC (azul, rojo transparente, transparente) y 2 tipos de poliexpán (amarillo y blanco).

Como fuentes de luz para iluminar las muestras a analizar se utilizarán los ya mencionados en el Apartado 3.2: para reflexión el *Photonics Headwall 1004A-21519* mostrado en la Figura 3.3 y para transmisión el *PROVIX LS250 ML02311411* mostrado en la Figura 3.4. Las firmas espectrales obtenidas de ambas fuentes de alimentación para comprobar su capacidad de iluminar en el rango NIR se pueden observar en las Figuras 4.5 y 4.6.

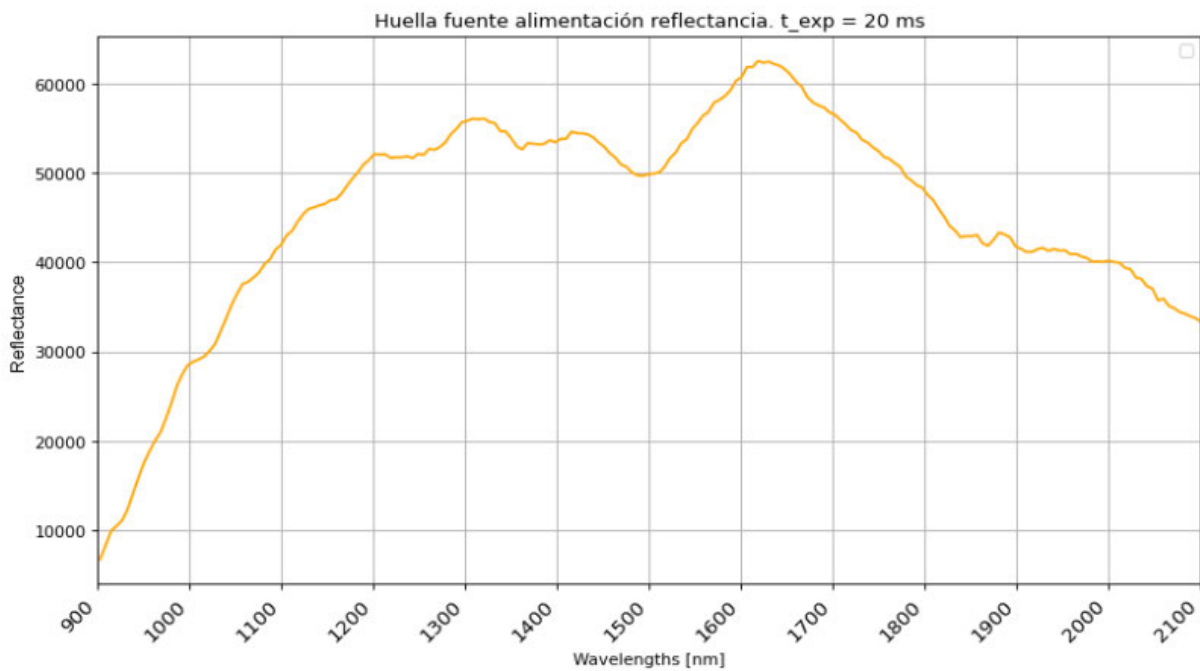


Figura 4.5. Firma fuente de alimentación en reflectancia Headwall Photonics.

Por último, las muestras de MP se colocarán en placas de pocillos de poliestileno, que servirán para muestrear en seco y en acuoso.

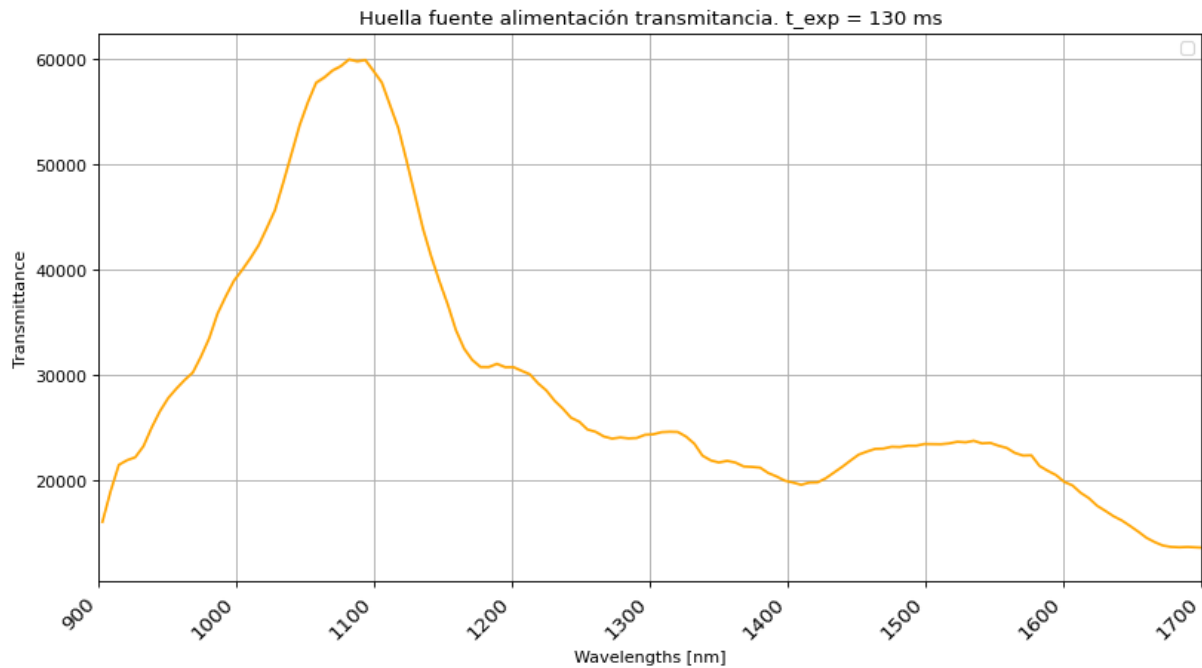


Figura 4.6. Firma fuente de alimentación en transmitancia PROVIX LS250.

4.3. Descripción del código

El software de obtención de la imagen hiperespectral mencionado en el Apartado 4.2 se basa en las librerías del fabricante *Headwall Photonics* para formar dos nuevos archivos, uno de ellos almacena el cubo hiperespectral y un segundo archivo donde se almacenan los parámetros de la captura realizada.

Para formar el cubo hiperespectral, se recoge la información de energía captada por la cámara hiperespectral, se almacena en un archivo de tipo ENVI, el cual es un tipo de fichero estandarizado para este tipo de imágenes, donde se forma una matriz de datos de energía lumínica por cada por banda espectral que es capaz de captar la cámara, donde cada posición de los valores recogidos equivale a una posición concreta espacial de la imagen capturada.

El segundo archivo creado es una cabecera que nos da información sobre los diferentes parámetros del primer archivo generado. Los datos más importantes a tener en cuenta durante el manejo del cubo hiperespectral serán: el tipo de archivo generado (en nuestro caso ENVI), número de muestras capturadas por cada línea de captura (directamente relacionada con el ancho de la imagen hiperespectral obtenida), número de líneas de captura (directamente relacionado con el alto de la imagen hiperespectral obtenida), número de bandas capturadas por la cámara hiperespectral (en el caso de la cámara utilizada serán 272 bandas), unidades de las longitudes de onda capturadas y el valor de las 272 longitudes de ondas capturadas.

Para manejar el cubo hiperespectral formado tras la captura de la imagen, se toma como base las

bibliotecas de manejo de imágenes hiperespectrales facilitadas por el CITSEM. Estas bibliotecas ayudan con la manipulación del archivo generado anteriormente, permitiendo recorrer los valores de energía con facilidad para, posteriormente, formar la huella espectral en formato gráfica.

Para obtener la huella espectral de una zona concreta de la imagen hiperespectral, es necesario realizar una calibración radiométrica, cuyo objetivo es la normalización de los valores capturados respecto a la máxima cantidad posible de luz capturada (a la que denominamos balance de blancos) y respecto al nivel basal de ruido del sensor de la cámara (al que denominamos balance de negros). Esta normalización se realiza tal y como se indica en el Apartado 2.4.2.2 con la ayuda de la siguiente fórmula:

$$\text{Imagen calibrada} = \frac{\text{Imagen original} - \text{Balance de negros}}{\text{Balance de blancos} - \text{Balance de negros}}$$

Para obtener el balance de negros, realizaremos una captura colocando la tapa del objetivo en la cámara hiperespectral, obteniendo así una imagen hiperespectral cuando no llega ningún rayo de luz a la cámara. Para obtener el balance de blancos al trabajar en reflexión, encendemos la fuente que trabaja en reflexión y colocamos bajo esta la cerámica de reflectancia difusa de la Figura 4.9 que refleja el 95 % de la energía lumínica recibida, finalmente se realiza la captura obteniendo así el balance de blancos. Para obtener el balance de blancos en transmisión, encendemos la fuente de luz conectada al difusor que trabaja en transmitancia y se realiza una captura directamente a este difusor mientras emite energía lumínica.

Una vez formada la imagen calibrada, se abre la captura mediante un script que permite al usuario seleccionar los píxeles deseados de la imagen. Una vez seleccionados los píxeles objetivo, se realiza una media de los valores de energía en ese area seleccionada, se recorren las diferentes matrices y se genera una gráfica colocando en el eje X el valor de energía (en % debido a la fórmula utilizada para calibrar la imagen) y en el eje Y el valor de longitud de onda asociado a la matriz correspondiente. Una vez recorridas las matrices hasta la longitud de onda que queramos dibujar, obtenemos la huella hiperespectral de un objeto concreto dibujada en una gráfica como la de la Figura 4.8.

4.4. Estudio del tiempo de exposición óptimo

Toda caotura es tomada con un tiempo de exposición concreto, es decir, es la cantidad de tiempo que el obturador se mantiene abierto, regulando así la cantidad de fotones que pueden entrar en el sensor de la cámara. En el caso de este proyecto, dicho tiempo se puede modificar en los parámetros de la cámara hiperespectral tal y como se muestra en el Apartado 4.2.

Para comprobar en el experimento el tiempo de exposición idóneo, se ha utilizado un dispositivo óptico denominado polímero de referencia (Sphere Optics - Zenith Polymer) mostrado en la Figura 4.7, el cual está compuesto por una serie de cristalizaciones que, al interactuar con la

luz, refleja una firma espectral concreta. Dicha firma la proporciona el fabricante para poder calibrar sistemas hiperespectrales. Con el propósito de obtener una firma lo más cercana posible a la facilitada por el fabricante, se realizará un barrido de tiempos de exposición, con lo que cambiaremos la cantidad de luz que capta la cámara, modificándose así la firma detectada en el laboratorio. Se compararán las firmas detectadas con los datos facilitados por el fabricante y se elegirá un tiempo de exposición concreto con el que trabajar en transmisión.



Figura 4.7. Polímero de referencia "Zenith Polymer" del fabricante Sphere Optics.

Se comprueba la firma espectral del polímero de referencia del fabricante trabajando en transmitancia realizando un barrido de los siguientes tiempos de exposición en milisegundos: 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, 240, 260, 280 y 300.

Después de comparar las respuestas captadas por la cámara hiperespectral en el rango 900 - 1700 nm que buscamos para caracterizar MP, se seleccionará un tiempo de exposición concreto para realizar las pruebas correspondientes durante la captura de los MP en seco y en acuoso.

Después de comprobar las 16 capturas comparando la firma espectral del laboratorio con la del fabricante se llega a la conclusión de que el tiempo de exposición idóneo para nuestro experimento cuando se trabaja en transmitancia es de 130 ms, se puede observar que se consigue un resultado similar al fabricante en la Figura 4.8.

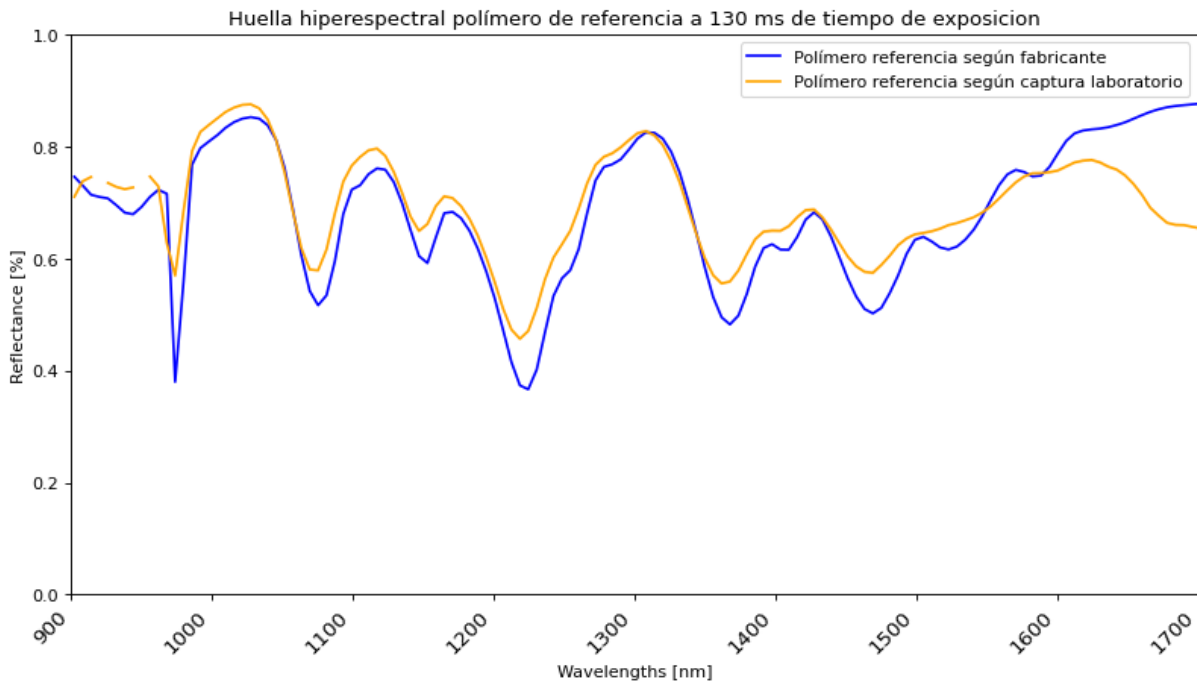


Figura 4.8. Comparación de la firma espectral del polímero de referencia entre la captura de laboratorio y el fabricante.

Para caracterizar los plásticos adquiridos, será necesario utilizar la fuente que opera en reflexión, debido a la opacidad del material a estudiar y su dificultad de transmitir energía lumínica, por ello será necesario comprobar el tiempo de exposición óptimo para trabajar en reflexión.

Para ello se procede a encontrar un tiempo de exposición óptimo para realizar las capturas trabajando en reflexión, ya que el difusor y bombilla de la Figura 3.3 emiten más energía que la fuente de luz que trabaja en transmisión. Para evitar la saturación de los datos de energía capturados por la cámara, debemos limitar el tiempo de exposición de la cámara hiperespectral. Para ello se realizarán capturas del balance de blancos trabajando en reflectancia, ya que es la máxima energía que podremos captar con la cámara en estas condiciones, comprobando que los datos no saturan en el rango NIR. Para ello se utiliza la cerámica de reflectancia difusa de la Figura 4.9, compuesta por un material casi lambertiano, que refleja el 95 % de la energía lumínica recibida. Con esta placa colocada debajo de la cámara hiperespectral, realizamos un barrido de tiempos de exposición (20, 30 y 40 ms) para comprobar la abertura idónea. Los 20 ms de tiempo de exposición parecen ser los adecuados, se puede comprobar la firma de la fuente de alimentación en la Figura 4.5, donde se muestra cómo no saturan los valores de energía captados por la cámara cuando se captura la mayor energía lumínica posible en las condiciones de nuestro experimento.

4.5. Obtención de la firma de los plásticos a estudiar.

Tras disponer del sistema de captura, el software para controlarlo y del tiempo de exposición óptimo, se ha procedido a obtener la firma espectral de muestras de los 22 plásticos seleccionados. En este primer experimento, se han capturado imágenes de secciones de los plásticos de un tamaño suficientemente grande (nunca inferior a 3 centímetros cuadrados) como para garantizar que la mayor parte de la imagen correspondía al material plástico a caracterizar. Esta caracterización se ha llevado a cabo utilizando el método de captura por reflexión de la luz, en lugar de por transmisión, debido a que los materiales son opacos, por lo tanto no van a permitir la transmisión de la energía lumínica suministrada gracias a la fuente de luz. Este experimento tiene como objetivo comparar las firmas obtenidas con las observadas en el estado del arte y comprobar si existen diferencias en las firmas de plásticos iguales pero con diferente color y opacidad, para finalmente validar el sistema de captura en su conjunto.

Como se ha indicado en el Apartado 3.2 la fuente de luz que funciona en reflexión es capaz de emitir energía hasta 2100 nm, por lo que se podrá capturar información hasta este valor de longitud de onda y así, completar la firma obtenida en otros estudios donde se llega hasta los 1700 nm [2] [3] [4] [23] [24].

Para obtener las imágenes hiperespectrales que caracterizarán los plásticos, se ha colocado sobre una superficie lisa el recorte del plástico seleccionado, como se puede observar en la Figura 4.10. Luego se enciende la fuente de iluminación que actúa en reflectancia y, haciendo uso del software detallado en el Apartado 4.2, se realiza la captura, obteniendo así el cubo hiperespectral del plástico correspondiente.

Una vez realizada la captura del plástico, se procede a calibrar la imagen usando el balance de blancos tomada en la Figura 4.9 y el balance de negros. El balance de negros se obtiene colocando la tapa de la lente en el objetivo de la cámara hiperespectral y captura esa imagen. Una vez calibrada, se selecciona una región de la imagen donde se detecte el plástico correspondiente para realizar una media de los valores seleccionados.

Con los datos calibrados se conforma una gráfica mostrando la energía recibida por la cámara en el rango entre 900 y 2100 nm y se compara la firma espectral obtenida en el experimento con las firmas espectrales del estado del arte, comprobando si las firmas experimentales tienden a los valores de las firmas del estado del arte. Se espera que los resultados tengan ciertas diferencias respecto a las firmas del estado del arte por cambiar las condiciones del experimento realizado, ya que la captura de información se está realizando con bombillas, fuente de alimentación, difusor, cámara hiperespectral, con un software de procesado de información y con plásticos diferentes al de los experimentos del estado del arte. Entre las firmas de nuestro propio experimento se espera que existan diferencias entre mismos plásticos por la diversidad de colores y grados de transparencia del material adquirido. Los resultados de esta experimentación se encuentran en el Apartado 5.1

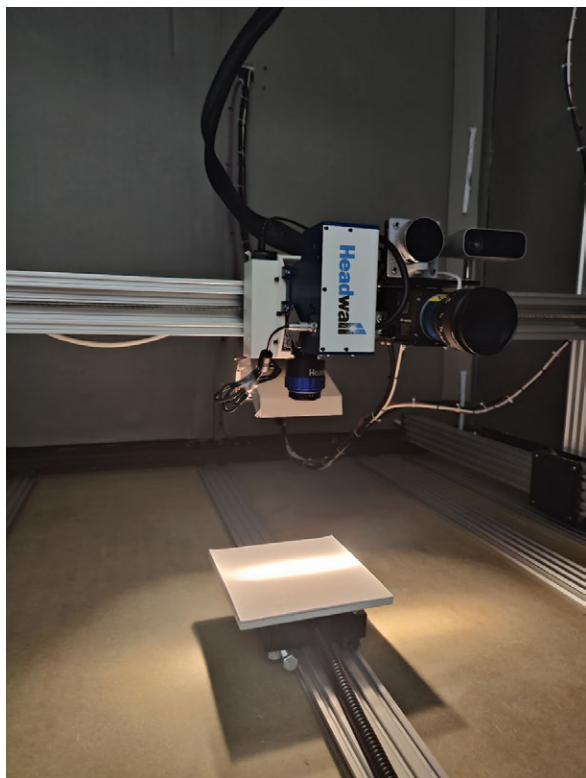


Figura 4.9. Montaje para capturar el balance de blancos en reflectancia.

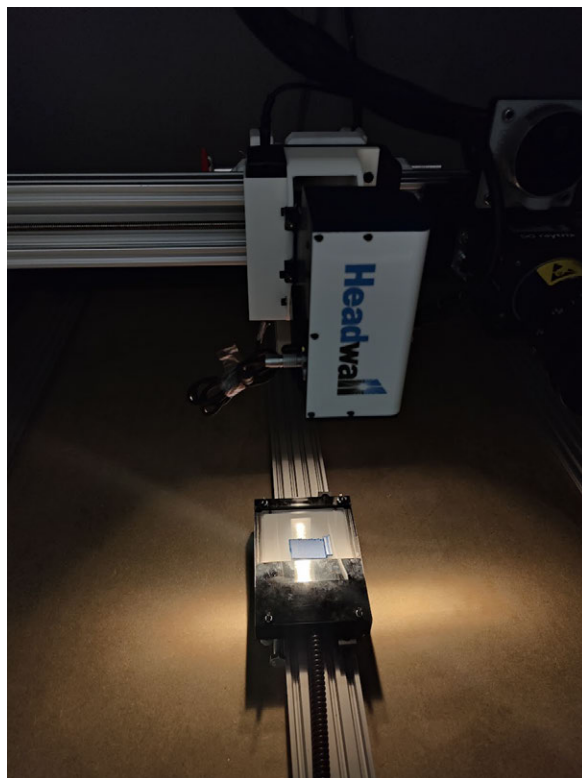


Figura 4.10. Montaje para capturar la muestra de polipropileno azul.

4.6. Obtención de microplásticos

Como se ha definido en el Apartado 2.1.1, los MP son partículas procedentes de polímeros con un diámetro menor a los 5 mm. Siendo así, es preciso manipular los plásticos adquiridos para obtener muestras que se ajusten a esta definición. Para realizar un estudio con distintos tamaños se han producido partículas con diámetros del orden de 2, 1, 0.8-0.7, 0.5-0.4 y 0.3-0.2 mm. Este rango de tamaños permite comprobar hasta qué punto el sistema diseñado es capaz de detectar MP con la configuración realizada para este experimento.

Estas partículas se obtendrán mediante métodos mecánicos, usando tijeras y cúter para los tamaños más grandes y una lima de grano fino para alcanzar tamaños de alrededor de 0.2 mm. Se han comprobado los tamaños de todos los MP generados con la ayuda de una lupa binocular con guía, cuya escala se puede observar en la Figura 4.11. Se muestra un MP visto desde la lupa en la Figura 4.12

Una vez generados todos los MP se clasifican en las placas de pocillos de poliestileno, obteniendo un total de 110 MP diferentes, se muestra la clasificación de las muestras generadas en la Figura 4.13.

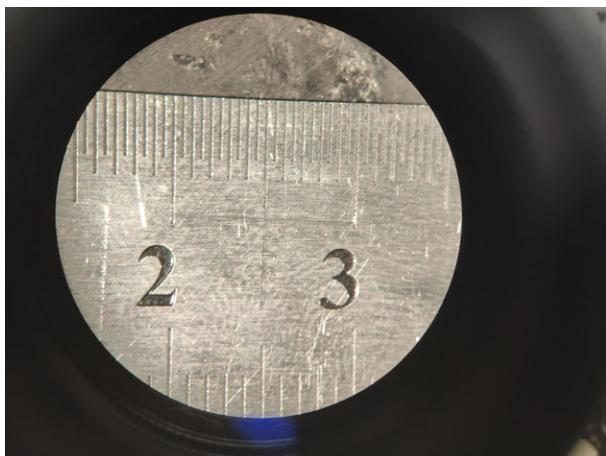


Figura 4.11. Vista lupa binocular con guía.

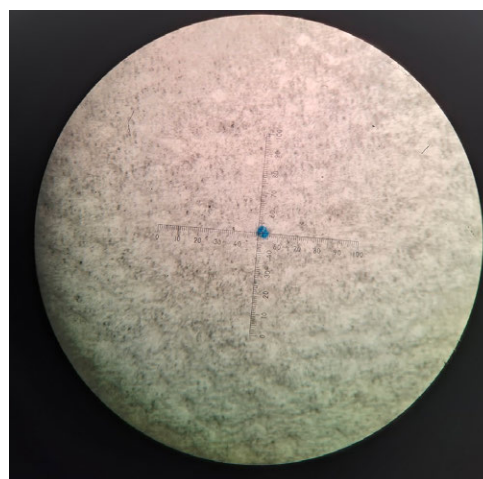


Figura 4.12. Vista microplástico de 0.5 mm de diámetro usando lupa binocular.



Figura 4.13. Placas de pocillos con los microplásticos generados.

4.7. Caracterización de la placa de pocillos

La base donde desde la que se capturarán todos los MP generados será la placa de pocillos de PS, por lo tanto será necesario caracterizarla tanto en seco como en acuoso para comprobar la firma espectral de la que se partirá a la hora de detectar los MP generados.

Para realizar esta captura, se realiza una captura colocando la impresión 3D realizada por el CITSEM que obstaculiza la contaminación lumínica entre muestras de la placa de pocillos, se puede observar en la Figura 4.14, para evitar posibles interferencias por parte del pocillo que llenamos con 1.3 ml de agua simulando el medio acuoso. Esta placa de pocillos se coloca sobre el difusor en transmisión y se realiza la captura con la cámara hiperespectral. Las firmas espectrales de la placa de pocillos en seco y en acuoso se muestran en la Figura 4.15

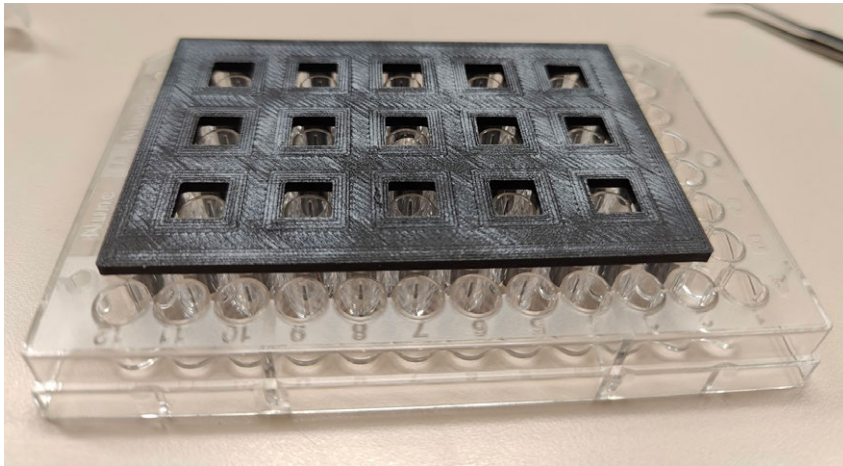


Figura 4.14. Placas de pocillos con impresión 3D para evitar reflejos.

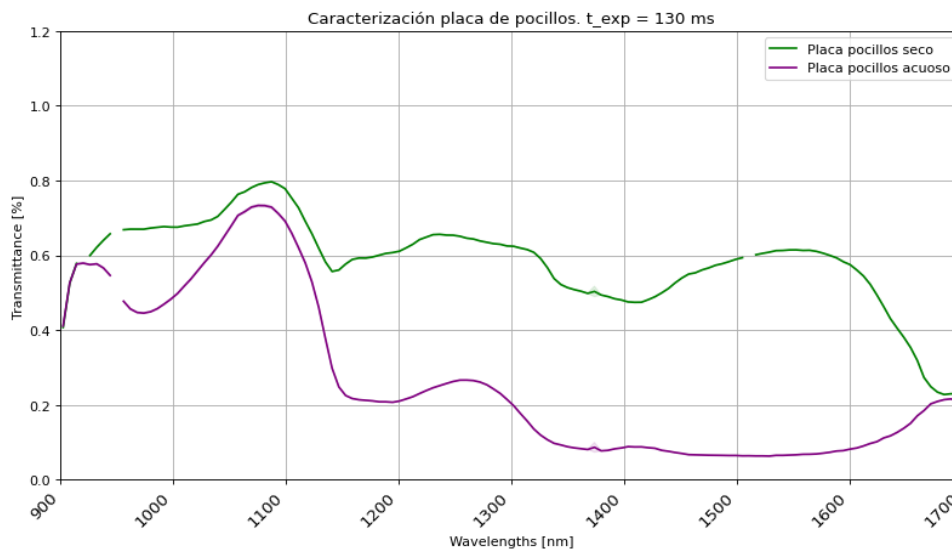


Figura 4.15. Caracterización de la placa de pocillos en medio seco y acuoso.

4.8. Caracterización de microplásticos en medio seco

Para conseguir las imágenes hiperespectrales en medio seco se colocan las placas de pocillos con un MP por cada pocillo sobre el difusor que se encuentra en el cubo de la Figura 3.1. Se enciende la fuente de iluminación que funciona en transmisión (PROVIX LS250), se cierra la puerta del cubo para evitar la interferencia del ruido lumínico del exterior y se realiza la captura siguiendo los pasos señalados en el Apartado 4.2. Una vez realizada la primera captura se repite la operación hasta haber caracterizado el total de 110 MP. A su vez es necesario obtener una captura con la tapa de lente en la cámara para guardar el balance de negros y otra captura sin placa de pocillos, apuntando directamente a la fuente de luz, para tener el balance de blancos y poder obtener las imágenes de calibración.

Una vez guardadas las capturas en crudo de los MP y los balances de blancos y negros, se pasa a procesar las imágenes capturadas y crear la imagen calibrada, a partir de la cual, se obtienen las firmas espectrales de cada uno de los escenarios analizados.

Los resultados de esta experimentación se encuentran en el Apartado 5.2.

4.9. Caracterización de microplásticos en medio acuoso

Una vez realizado el estudio de los MP en medio seco, se debe comprobar el comportamiento que tiene el agua sobre la huella espectral de estos plásticos ya caracterizados, por ello se realizan estas capturas trabajando en transmitancia, ya que se quiere estudiar los cambios producidos en la huella espectral obtenida cuando los rayos de luz atraviesan tanto el medio acuoso como el MP a detectar y caracterizar.

Para preparar esta captura simulando el medio acuoso, será necesaria la impresión 3D ya mostrada en la Figura 4.14, que obstaculiza la interferencia lumínica derivada de los reflejos provocados por la luz atravesando el agua que se colocará en los pocillos con el fin de simular el medio acuoso, asegurando así solo la información referente a cada pocillo. Se colocan los MP ya capturados en el anterior Apartado en los pocillos que quedan libres, una vez situados, con la ayuda de una jeringuilla, se sumergen en 1.3 ml de agua por pocillo. Una vez preparada la placa, se coloca sobre el difusor, encendemos la fuente de alimentación que funciona en transmisión (PROVIX LS250), cerramos la puerta del cubo para evitar contaminación lumínica del laboratorio y realizamos la captura con la ayuda del software ya utilizado en los anteriores apartados, formando así el cubo hiperespectral de los MP en medio acuoso. Una vez realizada la captura, se procede a retirar los MP con ayuda de unas pinzas de laboratorio esterilizadas y se limpia la placa de pocillos con etanol, se espera al secado de la placa y se repite el proceso con otro grupo de MP, hasta haber realizado la captura de los 110 MP ya capturados en medio seco.

Una vez recopilados todas las imágenes hiperespectrales de los plásticos en acuoso, se procede a realizar una última prueba donde se busca detectar si distintos MP pueden provocar cambios en las firmas espectrales de otros MP que se encuentren próximos en espacio. En esta última fase de la experimentación, se colocan tres MP diferentes en un mismo pocillo (PE, PS y PVC) con agua inyectada con la jeringuilla para comprobar las posibles interferencias ya mencionadas. Primero se realiza una captura con los MP en contacto entre ellos dentro del pocillo y se realiza una segunda captura con los MP separados dentro del mismo pocillo.

Los resultados de esta experimentación se encuentran en el Apartado 5.3.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para caracterizar los distintos tipos de plásticos. En la sección 5.1 se comparan las firmas obtenidas de la caracterización de los plásticos en laboratorio y las referencias disponibles en la literatura científica. En la sección 5.2 se comprueba si se ha conseguido detectar y categorizar MP en un medio seco. Por último, en la sección 5.3 se analiza si, al estudiar MP en medio acuoso, se dificulta su detección y categorización.

5.1. Caracterización de plásticos

En primer lugar, y como se ha señalado en el apartado 4.5, se ha realizado una serie de capturas en modo de iluminación para trabajar en reflectancia de los plásticos incluidos en el proyecto, y con un tiempo de exposición de 20 ms. La elección de este tiempo se ha justificado en el Apartado 4.4, se debe limitar la abertura del obturador para evitar la saturación de los datos de energía recogidos por la cámara hiperespectral.

Cada una de las secciones siguientes presentan las respectivas comparativas entre las firmas obtenidas para los distintos tipos de plásticos analizados y las referencias encontradas en el estado del arte. En el Anexo se incluyen el total de capturas realizadas, estando aquí solo las más representativas.

5.1.1. Polietileno

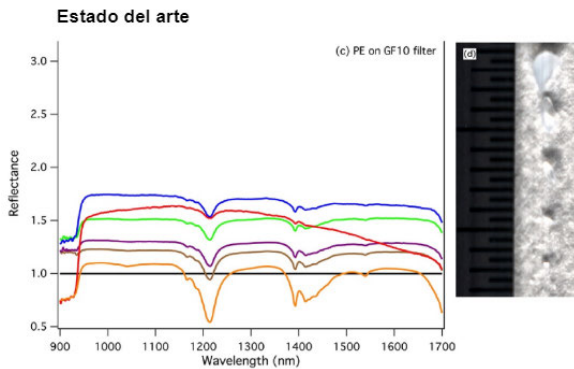


Figura 5.1. Firma espectral polietileno de referencia [4].

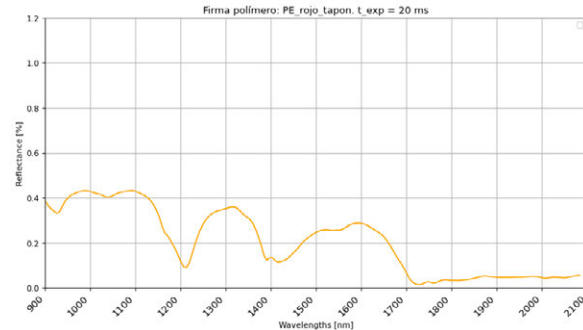


Figura 5.2. Firma espectral polietileno obtenida en el laboratorio.

Se puede observar la tendencia característica de la absorbancia a 1200 y 1400 nm tanto en el estado del arte como en las capturas realizadas en laboratorio, en las que se muestra además una pequeña absorbancia característica a 1400 nm de longitud de onda, exceptuando como se ha indicado anteriormente, en el PE de color negro. Se puede afirmar que las firmas espectrales capturadas, Figura 5.2, concuerdan con la firma del estado del arte mostrada en la Figura 5.1.

5.1.2. Polipropileno

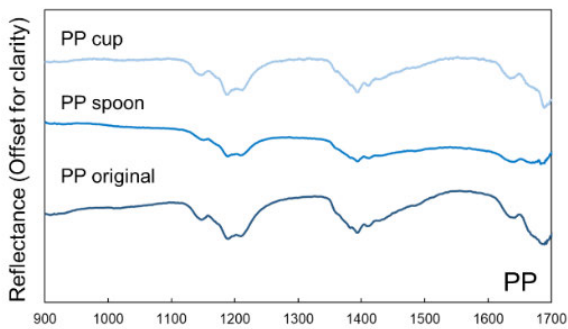


Figura 5.3. Firma espectral polipropileno de referencia [23].

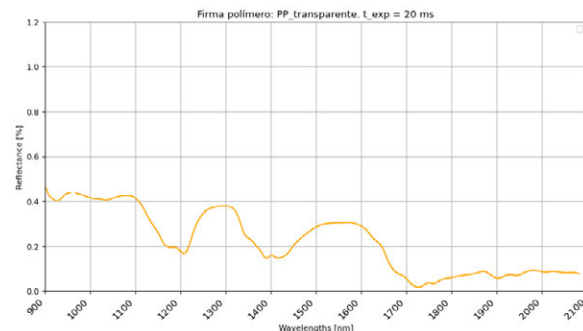


Figura 5.4. Firma espectral de polipropileno obtenida en el laboratorio.

Se puede observar que el PP tiene un patrón de absorbancia característico entre 1150 y 1220 nm, a 1400 nm y a partir de 1610 nm de longitud de onda en la referencia. Sin embargo, aunque las dos primeras zonas de absorbancia coincidan con las firmas obtenidas en el laboratorio, no se perciben las pequeñas variaciones en la firma. Con respecto a la absorbancia característica a partir de los 1610 en la captura realizada en laboratorio resulta indetectable debido a la abrupta bajada de energía, observada también en la firma de referencia, y a una escasa resolución en ese

rango del espectro electromagnético.

5.1.3. Poliestireno

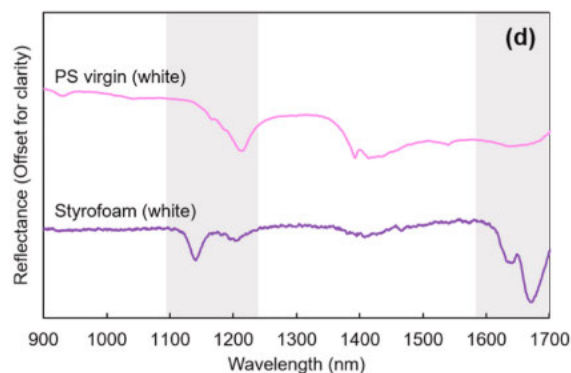


Figura 5.5. Firma espectral poliestireno estado del arte [23].

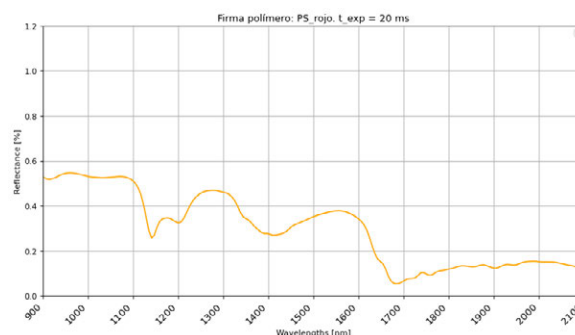


Figura 5.6. Firma espectral de poliestireno obtenida en el laboratorio.

Como se puede apreciar en la firma de referencia, Figura 5.5, el patrón de la absorbancia característica mostrado en la Figura 5.6, coincide con la firma del poliestireno extruido (*Styrofoam*), mientras que la segunda absorbancia característica, coincide con la firma del poliestireno virgen.

5.1.4. Policloruro de vinilo

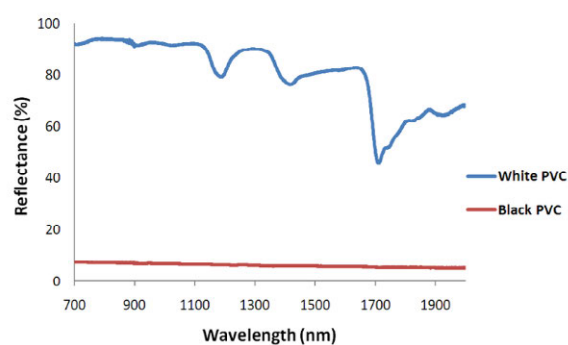


Figura 5.7. Firma espectral PVC de referencia [24].

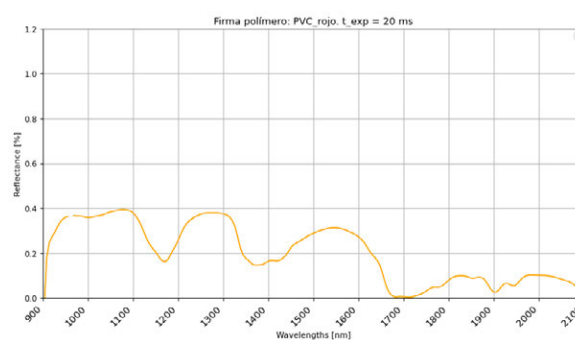


Figura 5.8. Firma espectral de PVC obtenida en el laboratorio.

Como se puede observar en la firma de referencia, Figura 5.7, se aprecian absorbancias características a 1180 nm, 1400 nm y un patrón de firma similar el rango 1700 - 1900 nm que coincide con el patrón observado en la firma del PVC de color rojo mostrado en la Figura 5.8.

5.1.5. Poliestireno expandido

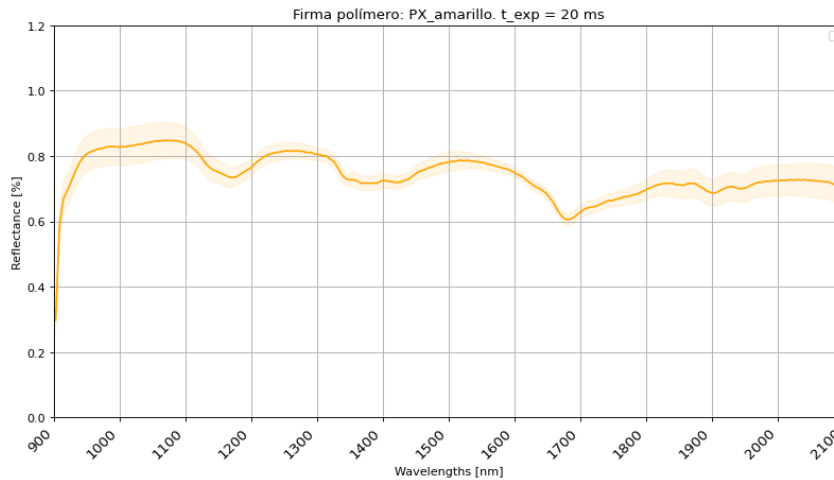


Figura 5.9. Firma espectral de PX obtenida en el laboratorio.

Al no encontrarse en el estado del arte firmas espectrales del PX, se compara la firma capturada en laboratorio mostrada en la Figura 5.12 con la del poliestireno extruido (Figura 5.5), corroborando que existen similitudes en las absorbancias características a 1150 nm, 1400 nm y 1650 nm de longitud de onda. Dados estos resultados, se puede afirmar que tanto el poliestireno como sus derivados, tienen firmas espectrales con suficientes equivalencias como para poder inducir a error durante un análisis de firmas espectrales entre poliestirenos con diferentes tratamientos.

5.1.6. Espuma de polietileno

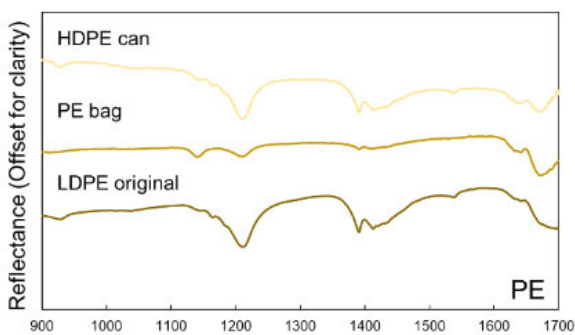


Figura 5.10. Firma espectral de derivados de PE de referencia [23].

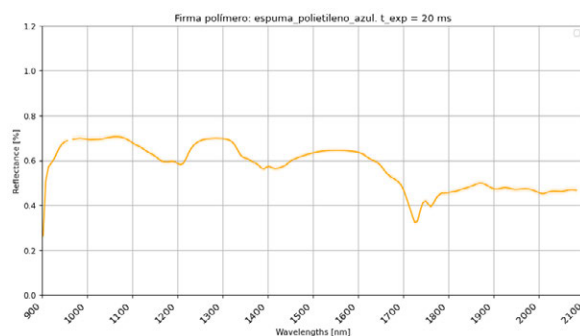


Figura 5.11. Firma espectral de espuma de polietileno obtenida en el laboratorio.

No se han encontrado firmas espectrales de la espuma de polietileno en el estado del arte, pero sí del polietileno de alta y baja densidad (Figura 5.10), cuyas firmas coinciden con las firmas del PE mostradas en la Figura 5.1, pudiéndose apreciar similitudes en las absorbancias características a

1200 nm y 1400 nm de longitud de onda.

5.1.7. Etileno propileno dieno de tipo M

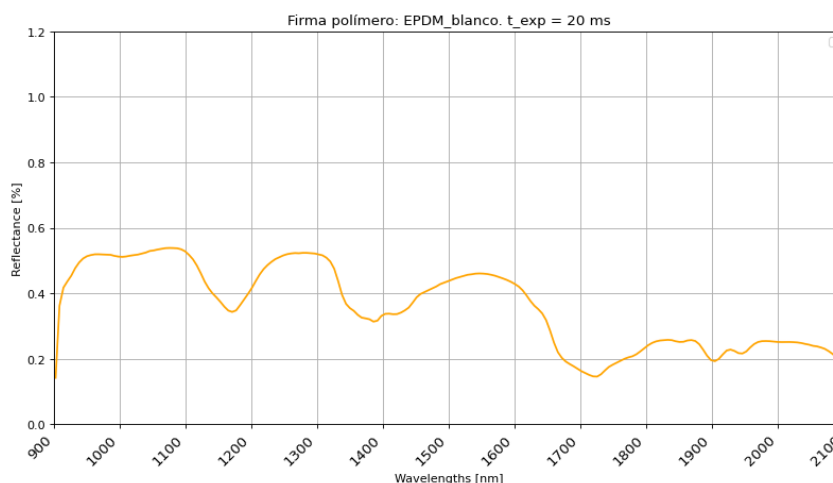


Figura 5.12. Firma espectral de EPDM obtenida en el laboratorio.

No se encuentran firmas en el estado del arte del EPDM, por lo tanto se caracterizan mediante las capturas realizadas en laboratorio. El EPDM tiene absorbancias características a 1170 nm, 1400 nm y 1640 nm de longitud de onda.

Los resultados obtenidos durante esta fase de caracterización han sido satisfactorios, ya que los patrones de las firmas de referencia coinciden con los patrones de las firmas obtenidas en laboratorio. Se ha deducido, por los resultados obtenidos en las firmas captadas en laboratorio, que los derivados de distintos plásticos, tendrán firmas similares al plástico sin tratar. Finalmente se ha realizado la caracterización del EPDM, plástico del que no se ha encontrado firma espectral de referencia en el estado del arte.

5.2. Caracterización de microplásticos en seco

Como se explica en el Apartado 4.8, se han obtenido imágenes hiperespectrales de los 110 MP (22 plásticos diferentes en 5 tamaños diferentes).

En este apartado, se muestran únicamente las firmas espectrales capturadas de los MP generados a partir del polietileno en la Figura 5.13, estando el resto de gráficas disponibles en el Anexo 2. En el caso del polietileno, la gráfica muestra con una sombra oscura la desviación de los datos de energía obtenidos a la hora de capturar el MP de 0.3 mm, respecto de la media resultante, dato coherente teniendo en cuenta que cuanto menor es el tamaño del MP estudiado, mayor es la dificultad de su detección y, por lo tanto, más dispares los datos de energía según

longitud de onda.

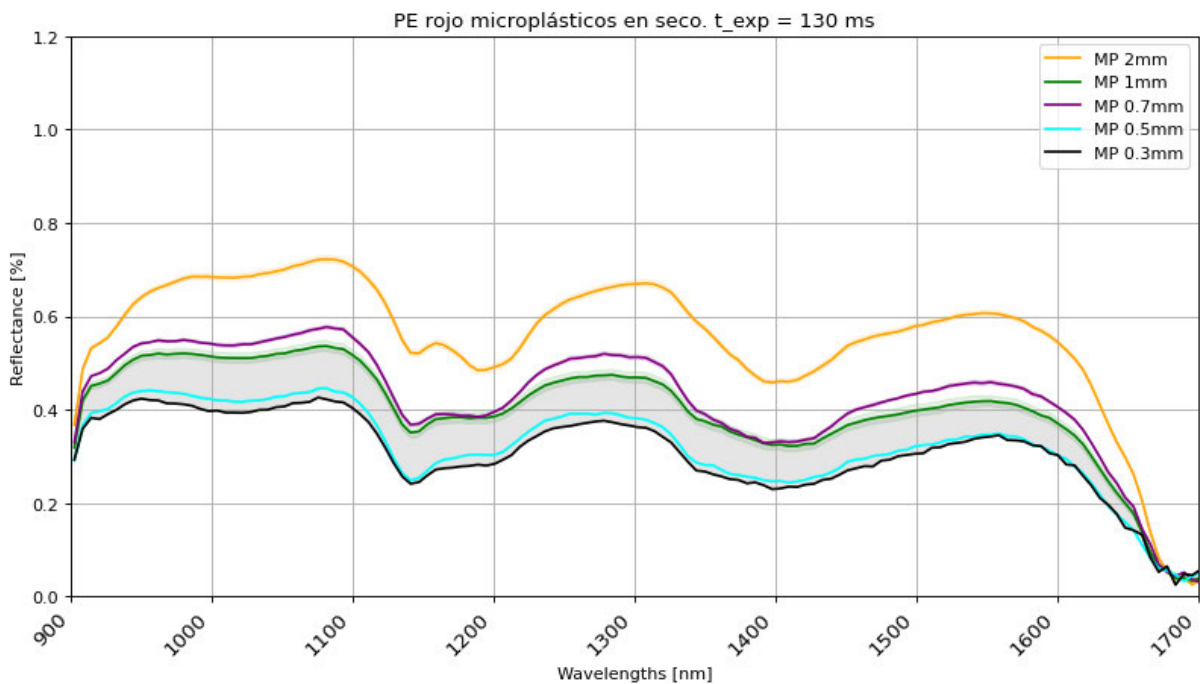


Figura 5.13. Firmas espectrales MP PE rojo en seco.

A partir de las firmas espectrales mostradas en el Anexo 2 se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Se han podido detectar todos los MP en seco.
- Las firmas espectrales de los MP de mayor tamaño, tienen una firma espectral con un mayor número de particularidades, haciéndolos más distinguibles respecto a la firma de la placa de pocillos caracterizada en el Apartado 4.7.
- Tal y como se señala en el Apartado 4.7, la acción de la placa de pocillos de poliestileno hace que las firmas de los MP tengan elementos en común y no sean totalmente distinguibles, tal y como ocurre en las firmas realizadas en el apartado 4.5.
- A pesar de lo anterior, se puede afirmar que el sistema es capaz de detectar MP mediante imagen hiperespectral ya que en todas las capturas realizadas a los MP se observan particularidades que los diferencian de la firma espectral de la placa de pocillos. Se deduce que las diferencias encontradas entre diferentes tipos de plástico surgen de los diferentes colores y opacidades de estos, ya que siguen un mismo patrón.

5.3. Caracterización de microplásticos en medio acuoso

Como se indica en el Apartado 4.9, una vez realizada las capturas en medio seco se procede a capturar los mismos 110 MP simulando el medio acuoso para realizar una comparación entre las firmas obtenidas y así comprobar la acción del agua a la hora de detectar estas partículas.

Se incluyen aquí las Figuras 5.14 y 5.15, donde se pueden ver los mismos MP capturados en dos medios diferentes. Como se puede apreciar, las absorbancias características del MP detectado permanecen constantes, con una ligera diferencia de cantidad de energía percibida. Sin embargo, a partir de los 1500 nm de longitud de onda, debido al efecto filtrante del agua, como se puede apreciar al comparar las firmas espectrales de la placa de pocillos mostradas en la Figura 4.15, el patrón convexo de la firma de los MP detectados en seco cambia a un patrón cóncavo en la firma de los MP en acuoso.

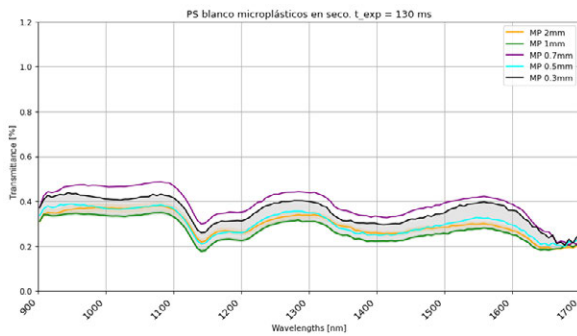


Figura 5.14. Firmas espectrales PS blanco en medio seco.

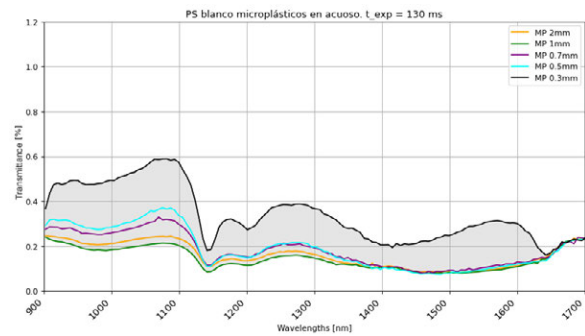


Figura 5.15. Firmas espectrales PS blanco en medio acuoso.

A partir de las firmas espectrales mostradas en el Anexo 3 se han llegado a las siguientes conclusiones:

- No se han podido detectar todos los MP en acuoso, debido a los errores en las firmas espectrales de las partículas de menor tamaño, dependiendo del tipo de plástico, color y opacidad. A partir de los 0.5 mm se dificulta su detección y se pierde la firma apreciada en las muestras de 0.7, 1 y 2 mm. Existen ciertas excepciones, como para el caso del PE de color rojo, cuya detección se ha conseguido en todos los tamaños de MP.
- Se observa como patrón en las diferentes firmas un incremento en el índice de detección de las piezas más oscuras y opacas.
- La acción del agua afecta a la firma espectral detectada de los MP, como se ha podido observar en la Figura 4.15, donde podemos observar cómo la energía captada por la cámara disminuye significativamente a partir de los 1300 nm, en una primera instancia no se esperaba una acción tan agresiva por parte del medio acuoso.

- Como ya ha ocurrido en el Apartado 5.2, la acción de la placa de pocillos de poliestileno caracterizada en el Apartado 4.7, hace que las firmas obtenidas de los MP sumergidos en medio acuoso tengan más dificultades para distinguir diferentes tipos de plástico respecto con el medio acuoso.

En el Apartado 4.9, se realiza una última prueba para comprobar si distintos tipos de MP pueden provocar cambios en las firmas espectrales de otros que se encuentren próximos en el espacio. Para ello se seleccionan 3 tipos de plásticos diferentes (PE, PS y PVC) y se introducen en un mismo pocillo con 1.3 mm de agua simulando el medio acuoso. Se realizan dos capturas, una con los MP en contacto entre sí y una segunda captura con los MP separados dentro del mismo pocillo. Las firmas espectrales obtenidas se muestran en las Figuras 5.16 y 5.17.

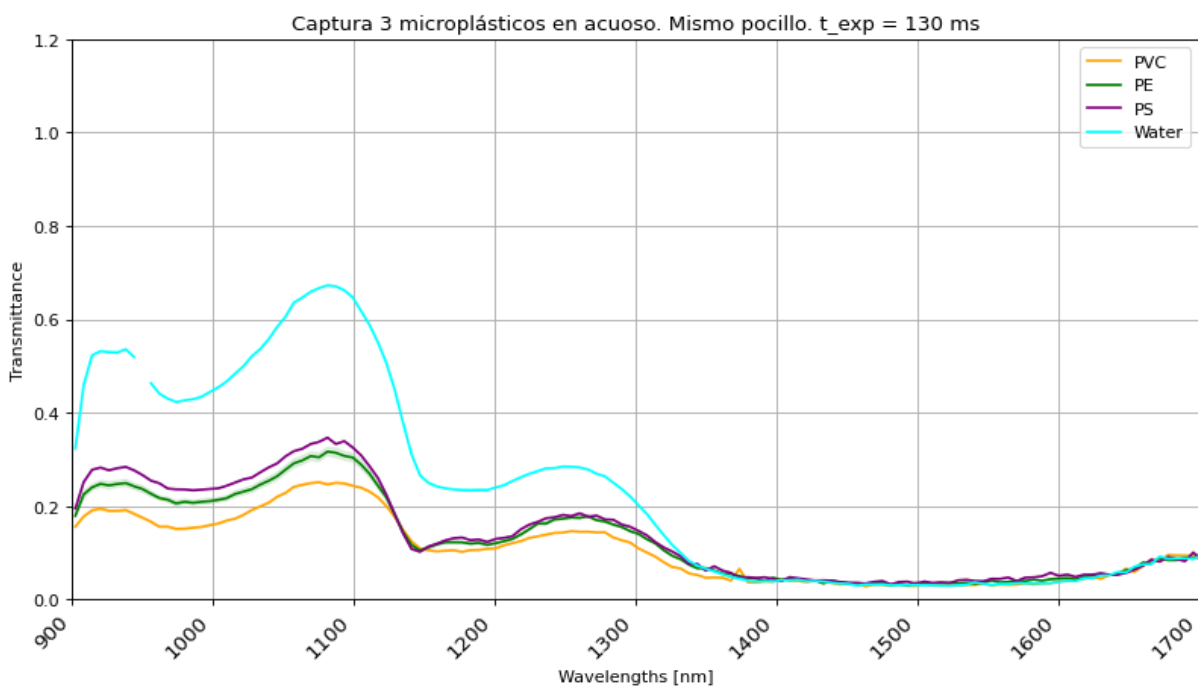


Figura 5.16. Firmas de tres microplásticos próximos en el mismo pocillo.

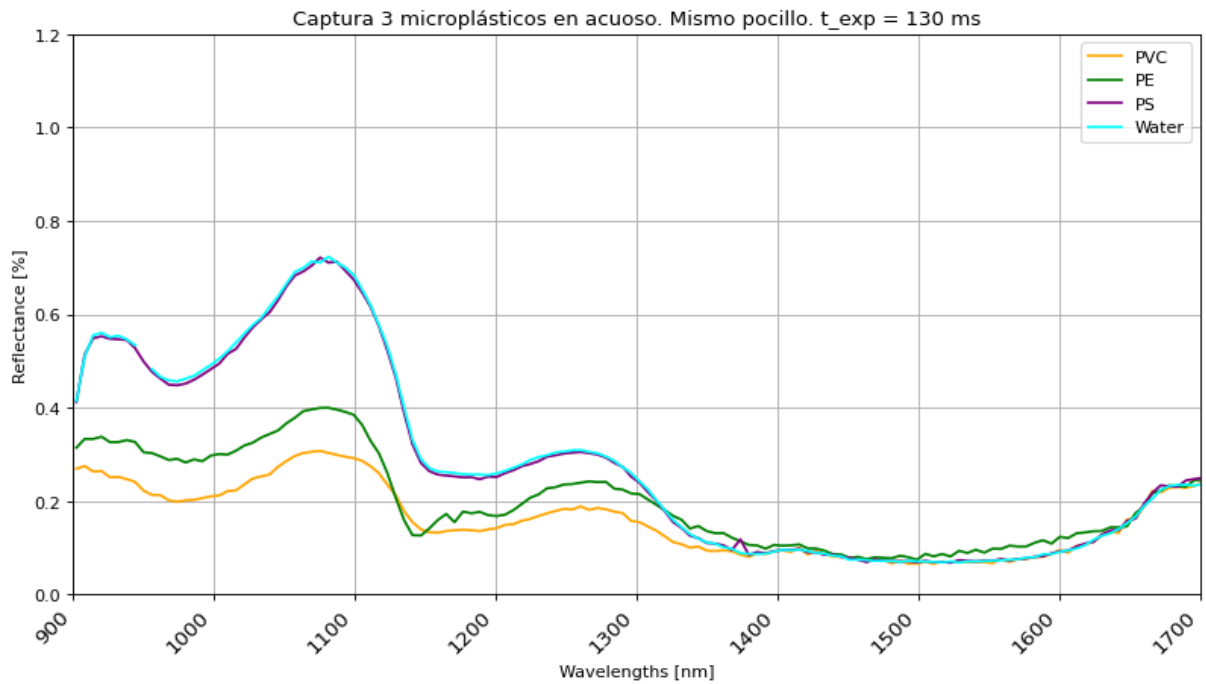


Figura 5.17. Firmas de tres microplásticos sin estar en contacto en el mismo pocillo.

De estas firmas espectrales obtenidas se deduce:

- En la Figura 5.16, cuando los MP se encuentran en contacto entre si, la energía lumínica que atraviesa estos cuerpos incide a su vez en los MP adyacentes, provocando que las firma sean similares, resultado esperable.
- En la Figura 5.17, cuando los MP se encuentran alejados se pueden percibir distinciones entre sus firmas. También podemos observar como la firma de la zona sin MP (*water* en la gráfica) es la misma que la firma del microplástico generado del poliestileno comprado, resultado esperable al ser la placa de pocillos de PS.

Capítulo 6

Presupuesto

A continuación se desglosa el presupuesto general del proyecto.

El coste de personal del proyecto ha sido:

Descripción	Precio	Horas	Subtotal
Presupuesto ingeniero	30€/h	320	9.600€
Consultoría ingeniero senior	40€/h	70	2.800€
Consultoría director	50€/h	60	3.000€
Total			15.400€

Tabla 6.1. Coste del personal del proyecto.

El coste de los distintos materiales necesarios para la ejecución del proyecto se ha estimado en:

Descripción	Precio
Fuente de iluminación y bombilla reflectancia	5.000€
Fuente de iluminación, difusor y bombilla transmitancia	4.000€
Cámara Headwall SWIR 640 y sistema móvil	200.000€
Muestras de plásticos a caracterizar	45€
Placas de pocillos	10€
Puesto de trabajo	1.000€
Total	210.055€

Tabla 6.2. Coste de materiales del proyecto.

Como coste de software del proyecto:

Descripción	Precio
Biblioteca Headwall	Suministrado por el fabricante
Sistema Operativo Linux	Código abierto

Tabla 6.3. Coste del software del proyecto.

Por lo tanto, el coste total del proyecto:

Coste personal	15.400€
Coste material	210.055€
Total	225.455€

Tabla 6.4. Coste total del proyecto.

Capítulo 7

Impacto del proyecto

En este capítulo se analiza tanto el impacto social como ambiental que este proyecto puede tener a corto y medio plazo.

Se estima que desde 1950 el ser humano ha producido más de 9.000 millones de toneladas métricas de plástico, habiéndose reciclado tan solo el 9%. Esto ha provocado una gran cantidad de desechos esparcidos y sin tratar por todo el mundo. Estos contaminantes acaban en el medio y, por la degradación a la que están sometidos, acaban formando MP que contaminan suelos y masas de agua. Si bien es cierto que recientemente en algunos países la producción de plásticos está siendo sometida a regulaciones más estrictas, la cantidad de microplásticos generados y que acaban en nuestro entorno haya frenado, más bien continúa aumentando progresivamente año tras año [25].

En este PFG se propone un método basado en el uso de tecnología hiperspectral para caracterizar MP en medios acuosos alternativo a los descritos en el estado del arte, ya que se encuentran grandes dificultades a la hora de detectar las partículas de menor tamaño. Este método permite, en contraposición a otros, la detección directa sobre el medio acuso sin necesidad de someter a las muestras a un proceso de secado. Esto, puede mejorar la rapidez en los procesos de detección y caracterización de microplásticos en medios líquidos así como ayudar en el desarrollo de técnicas de detección más eficientes y económicas.

En el plano social y ambiental, este PFG contribuye a mejorar el procedimiento en la detección de microplásticos y a comprender su comportamiento dentro del espectro electromagnético; lo que en un futuro, derivaría en mejoras de detección de MP y así ser capaces posteriormente de eliminar este contaminante.

Por estos motivos, se considera que este PFG contribuye a una serie de metas que se encuentran estrechamente alineadas con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, cuyo plan consiste en tomar medidas a favor de las personas, el planeta y la prosperidad de estas. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que se contribuye de forma directa son los siguientes [26]:

▪ **Objetivo 3: Salud y bienestar**

- **3.9** Reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y contaminación el aire, el agua y el suelo.

▪ **Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento**

- **6.3** Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos.

▪ **Objetivo 14: Vida submarina**

- **14.1** Prevenir y reducir significativamente la contaminación marina.
- **14.a** Aumentar conocimientos científicos, desarrollar la capacidad de investigación y transferir tecnología marina, a fin de mejorar la salud de los océanos y potenciar la contribución de la diversidad marina al desarrollo de los países en desarrollo.
- **14.c** Mejorar la conservación de los océanos y sus recursos.



Figura 7.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible de este Proyecto [26].

Capítulo 8

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones resultantes de la consecución de los hitos marcados para este proyecto y se proponen una serie de mejoras a futuro para el sistema y método desarrollados.

8.1. Conclusiones

Las principales conclusiones se resumen en los siguientes puntos:

- El sistema de captura ha sido validado y se ha comprobado su correcto funcionamiento tanto en reflectancia como en transmitancia. Se ha mostrado cómo es posible detectar las firmas espectrales de plásticos fotografiados en ambos modos de trabajo.
- Se han estudiado distintos tiempos de exposición y se ha fijado un valor óptimo de trabajo para los experimentos de este PFG de 20 ms para reflectancia y de 130 ms para transmitancia, parámetro importante para futuros experimentos que se realizarán en esta línea de investigación.
- A partir de los datos recogidos en el Apartado 4.5, es razonable concluir que el sistema desarrollado es capaz de caracterizar diferentes tipos de plásticos mediante el uso de HSI. En ese apartado se han realizado una serie de comparativas entre los datos obtenidos en este proyecto y los disponibles en el estado del arte. Siendo ambos correlativos y coherentes entre sí. Además se ha logrado caracterizar en laboratorio el plástico denominado EPDM por primera vez, ya que no se han encontrado firmas espectrales de este plástico en el estado del arte.
- Se ha mostrado cómo el sistema es capaz de detectar microplásticos en medio seco. Sin embargo, se ha identificado que al utilizar una placa de pocillos de material plástico, la

firma de la propia placa interfiere con el del plástico a caracterizar. Este efecto era esperable y se ha analizado el alcance del mismo.

- El sistema desarrollado permite distinguir microplásticos en medio acuoso hasta un tamaño de un milímetro de diámetro. Con tamaños de 0.5 mm de diámetro la precisión se reduce considerablemente, siendo solo identificables algunos tipos de plásticos. Además, se ha comprobado que la acción del agua dificulta la detección de MP por su efecto de filtrado en ciertas longitudes de onda.
- Los microplásticos, si se encuentran próximos unos de otros, afectan a sus huellas espectrales, provocando que sean indistinguibles.
- Para un mismo tipo de plástico se obtienen ligeras modificaciones en las firmas espectrales cuando cambian su color y su transparencia. Este efecto era el esperado.

8.2. Líneas de trabajo futuras

Para finalizar, se proponen una serie de líneas de trabajo futuro como mejoras tanto del sistema como del método de trabajo propuestos:

- Para futura experimentación, disponer de una placa de policarbonato revestido de oro o, en su defecto, de cristal transparente para mitigar el impacto del medio de medida en las firmas de los microplásticos.
- A partir de la metodología de trabajo desarrollada y dentro del contexto de los proyectos del CITSEM, se realizará la captura de una base de datos mucho más amplia para permitir generar un clasificador automático de plásticos basado en *Machine Learning*.
- Se podría sustituir la bombilla de la fuente de luz para disponer de energía hasta los 2500 nm de longitud de onda, aprovechando el rango completo en el que opera la cámara hiperespectral utilizada, permitiendo así valorar la idoneidad de esas bandas adicionales en la detección y caracterización de microplásticos.

Anexo

1. Firmas caracterización de plásticos

Conjunto de dos firmas espectrales por tipo de plástico obtenidas en laboratorio:

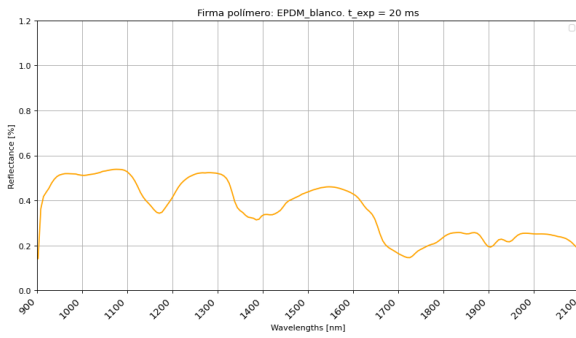


Figura A.1. Firma espectral EPDM blanco.

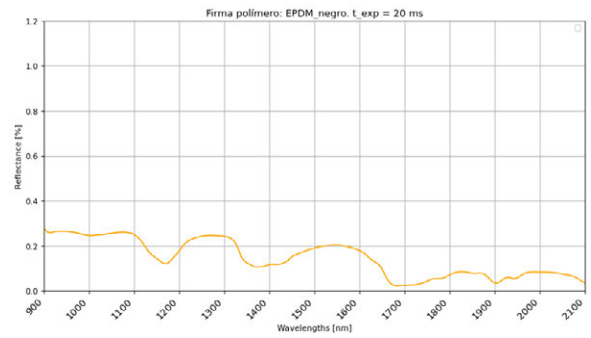


Figura A.2. Firma espectral EPDM negro.

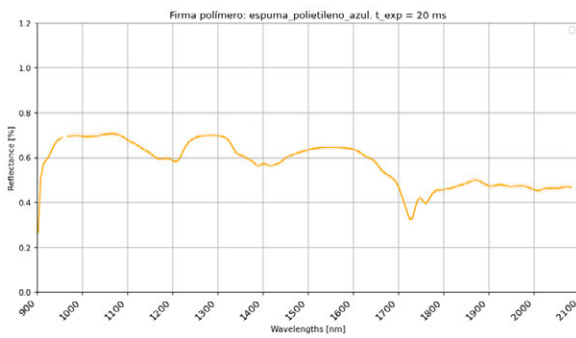


Figura A.3. Firma espectral espuma polietileno azul.

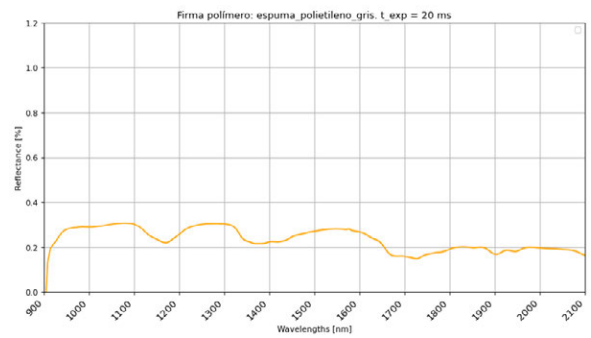


Figura A.4. Firma espectral espuma polietileno gris.

Anexo

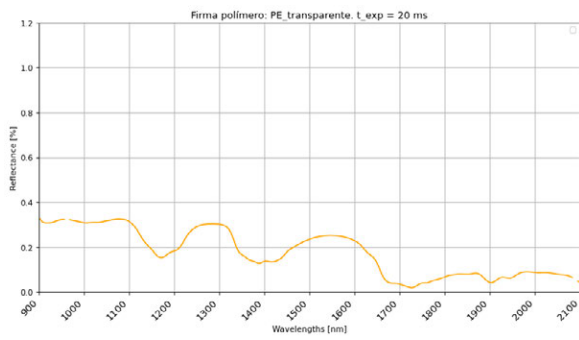


Figura A.5. Firma espectral PE transparente.

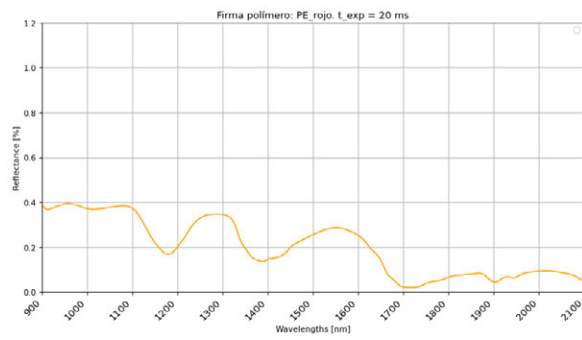


Figura A.6. Firma espectral PE rojo.

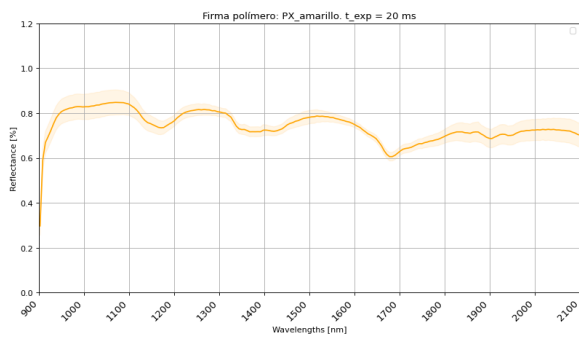


Figura A.7. Firma espectral poliespan amarillo.

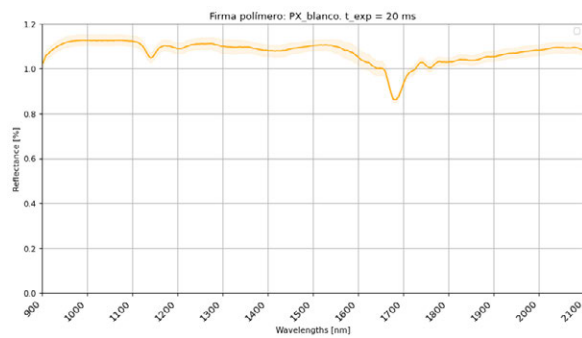


Figura A.8. Firma espectral poliespan blanco.

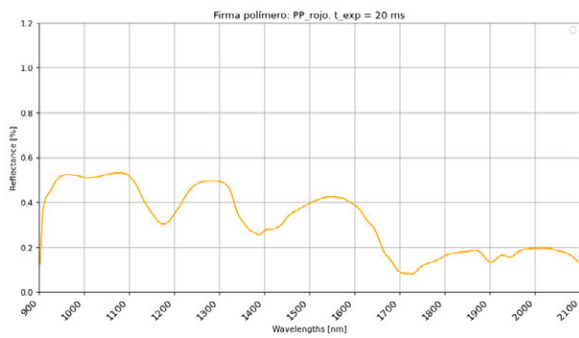


Figura A.9. Firma espectral PP rojo.

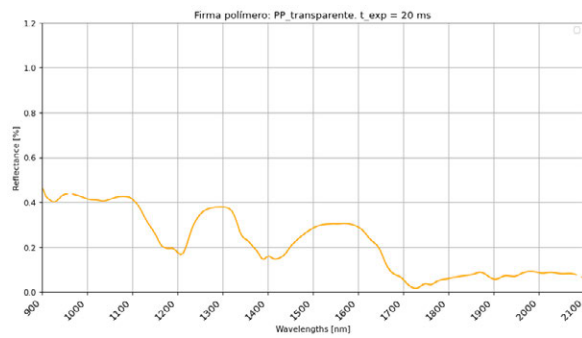


Figura A.10. Firma espectral PP transparente.

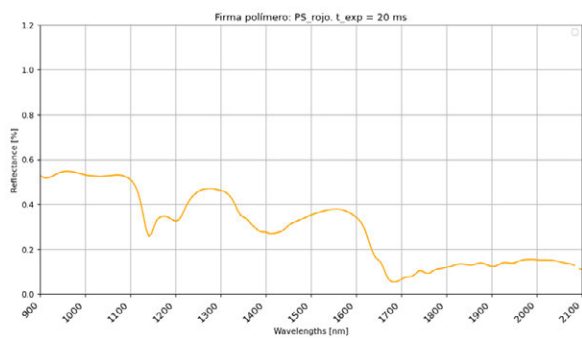


Figura A.11. Firma espectral PS rojo.

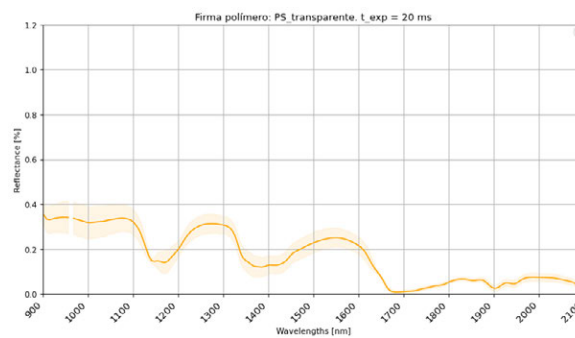


Figura A.12. Firma espectral PS transparente.

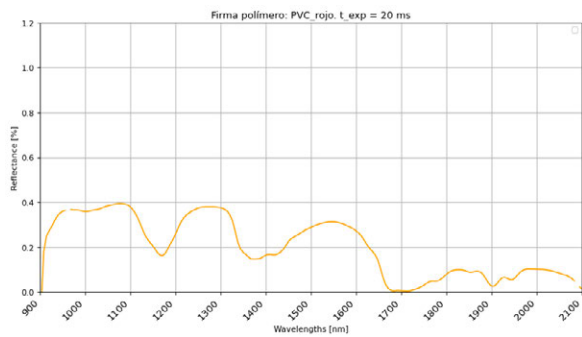


Figura A.13. Firma espectral PVC rojo.

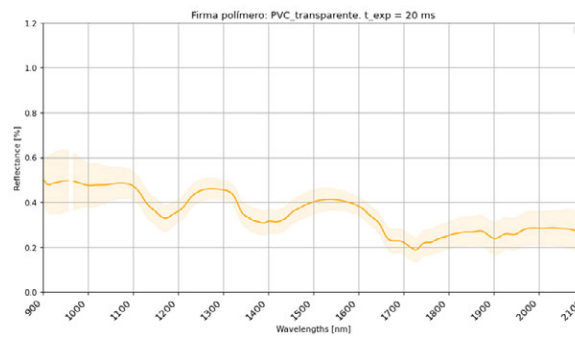


Figura A.14. Firma espectral PVC transparente.

2. Firmas detección microplásticos en seco

Conjunto de dos firmas espectrales por tipo de plástico obtenidas en laboratorio:

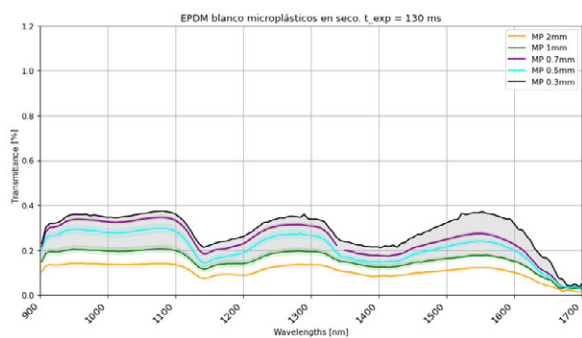


Figura A.15. Firmas espectrales EPDM blanco en seco.

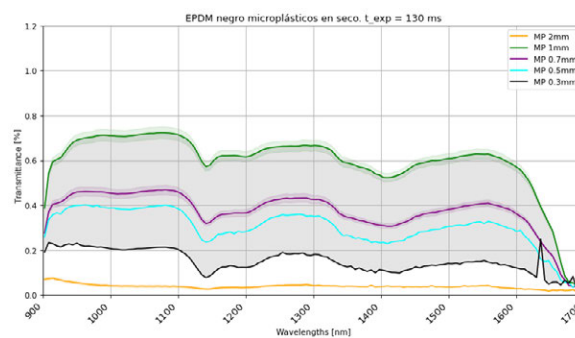


Figura A.16. Firmas espectrales EPDM negro en seco.

Anexo

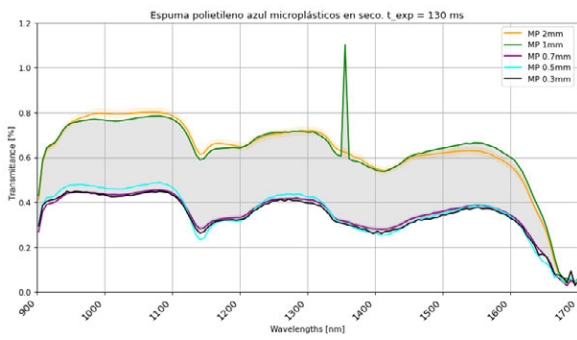


Figura A.17. Firmas espectrales espuma polietileno azul en seco.

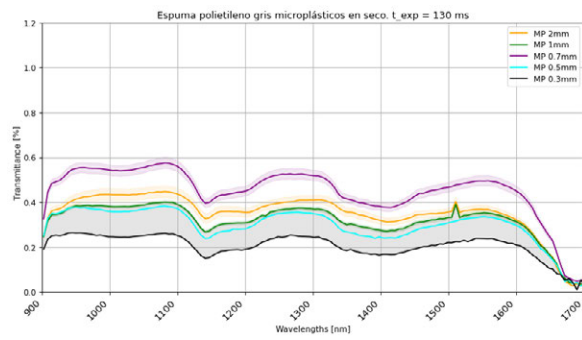


Figura A.18. Firmas espectrales espuma polietileno gris en seco.

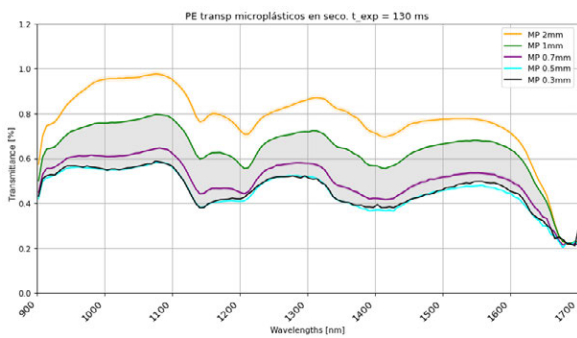


Figura A.19. Firmas espectrales PE transparente en seco.

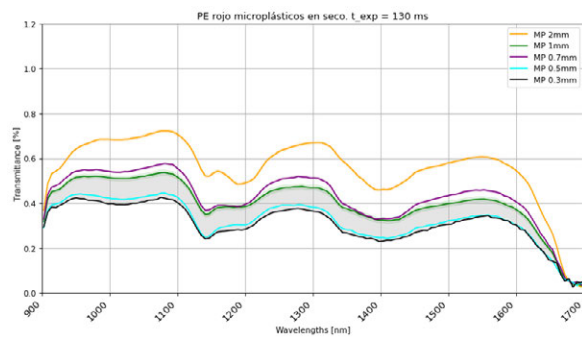


Figura A.20. Firmas espectrales PE rojo en seco.

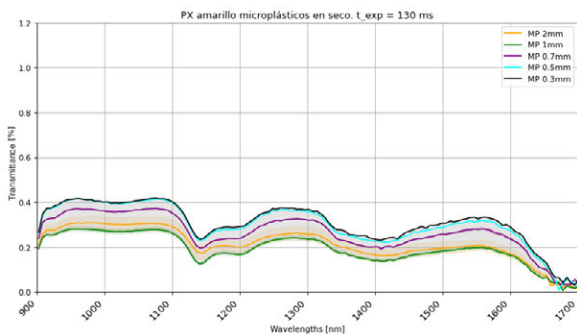


Figura A.21. Firmas espectrales poliespan amarillo en seco.

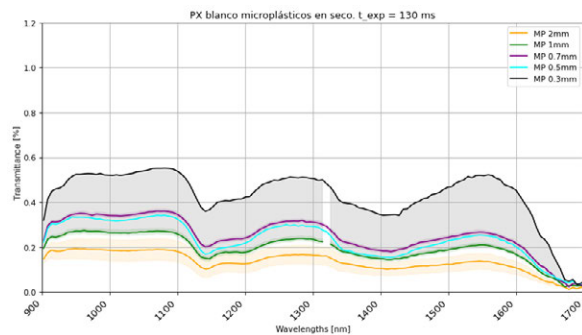


Figura A.22. Firmas espectrales poliespan blanco en seco.

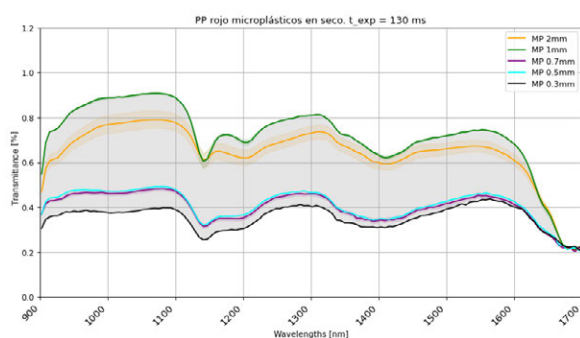


Figura A.23. Firmas espectrales PP rojo en seco.

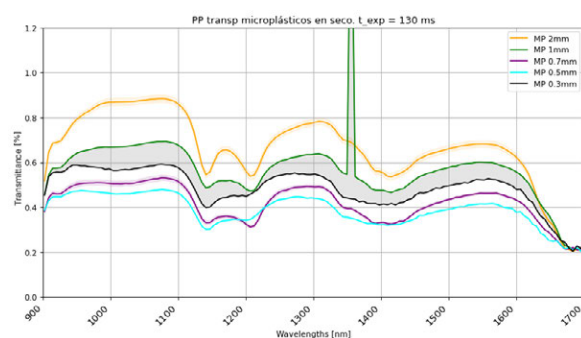


Figura A.24. Firmas espectrales PP transparente en seco.

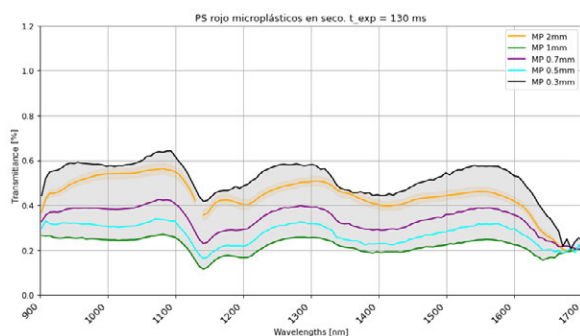


Figura A.25. Firmas espectrales PS rojo en seco.

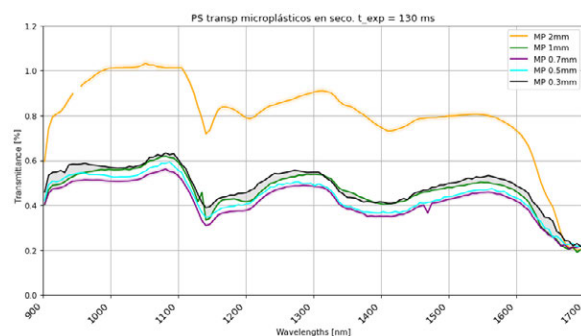


Figura A.26. Firmas espectrales PS transparente en seco.

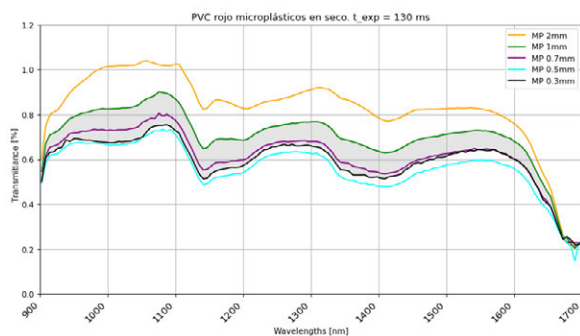


Figura A.27. Firmas espectrales PVC rojo en seco.

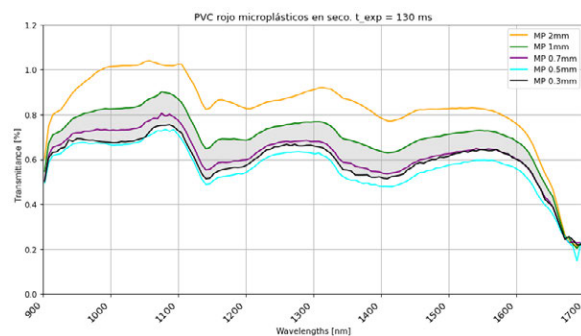


Figura A.28. Firmas espectrales PVC transparente en seco.

3. Firmas detección microplásticos en acuoso

Conjunto de dos firmas espectrales por tipo de plástico obtenidas en laboratorio:

Anexo

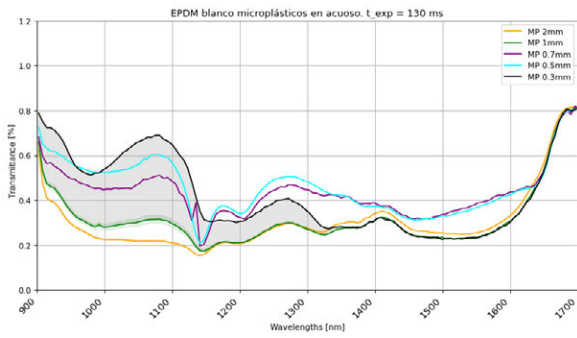


Figura A.29. Firmas espectrales EPDM blanco en acuoso.

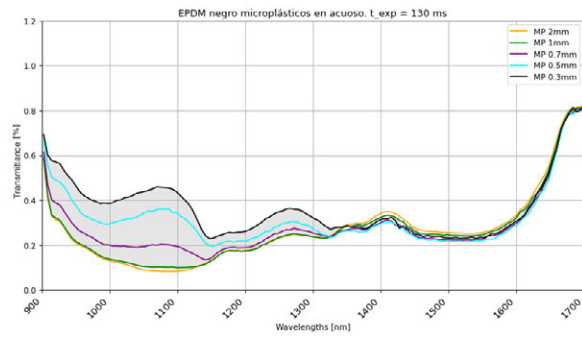


Figura A.30. Firmas espectrales EPDM negro en acuoso.

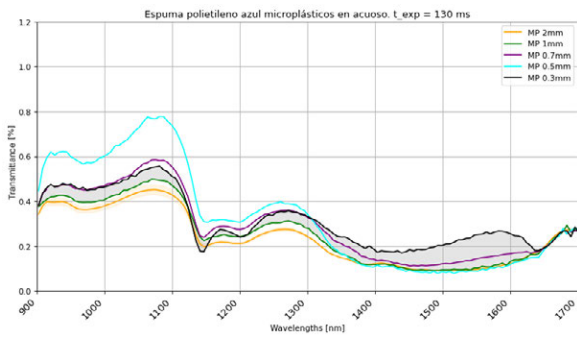


Figura A.31. Firmas espectrales espuma polietileno azul en acuoso.

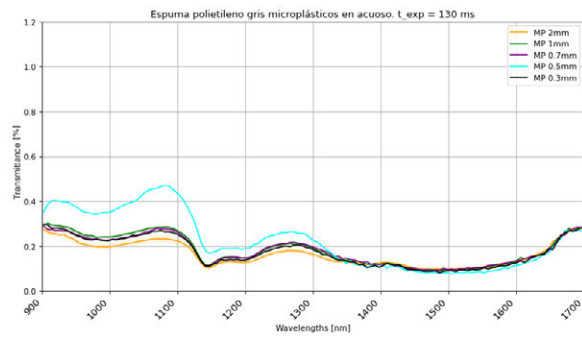


Figura A.32. Firmas espectrales espuma polietileno gris en acuoso.

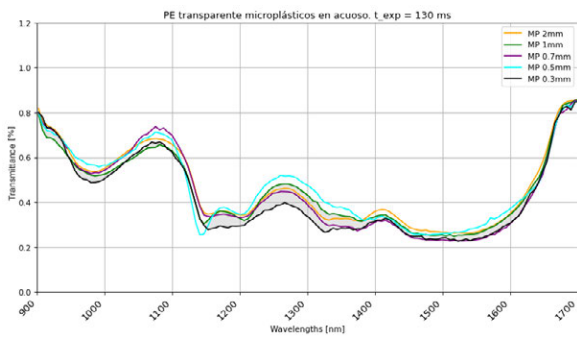


Figura A.33. Firmas espectrales PE transparente en acuoso.

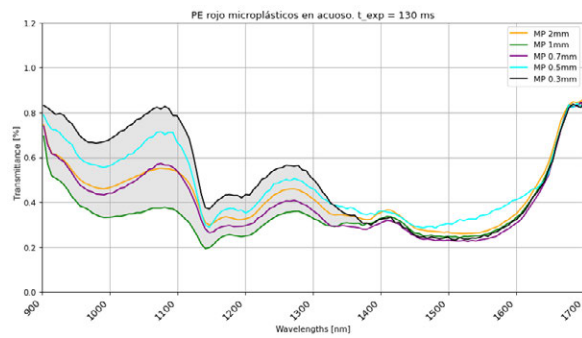


Figura A.34. Firmas espectrales PE rojo en acuoso.

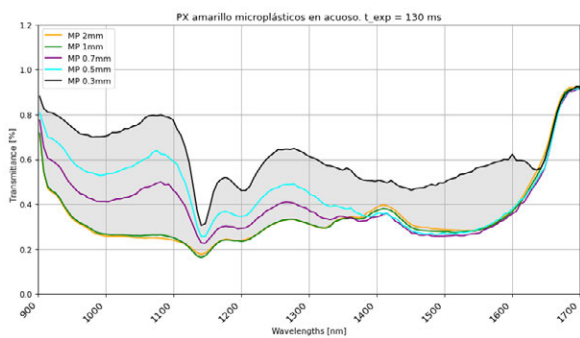


Figura A.35. Firmas espectrales poliespan amarillo en acuoso.

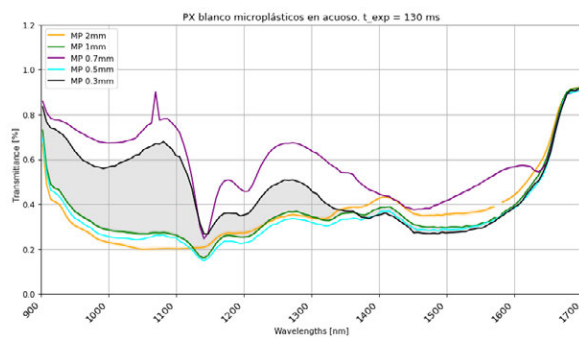


Figura A.36. Firmas espectrales poliespan blanco en acuoso.

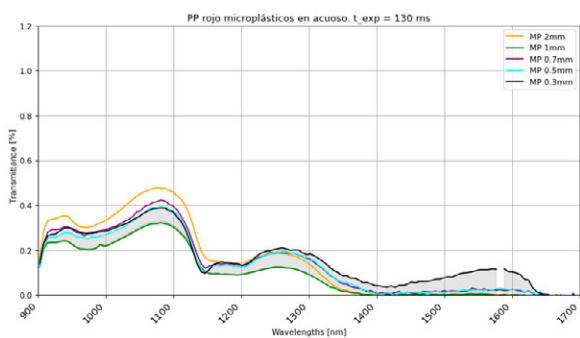


Figura A.37. Firmas espectrales PP rojo en acuoso.

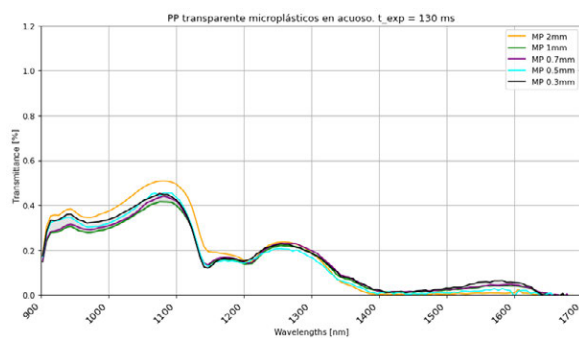


Figura A.38. Firmas espectrales PP transparente en acuoso.

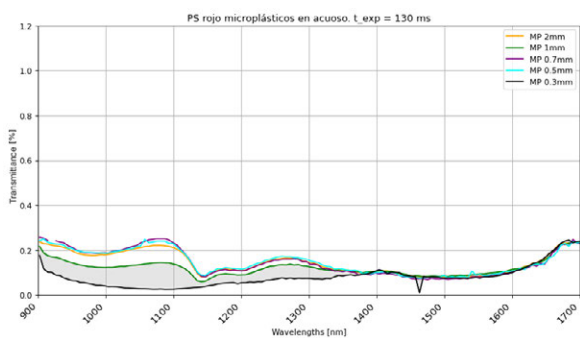


Figura A.39. Firmas espectrales PS rojo en acuoso.

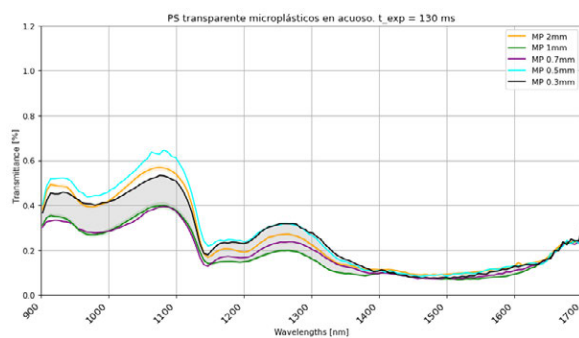


Figura A.40. Firmas espectrales PS transparente en acuoso.

Anexo

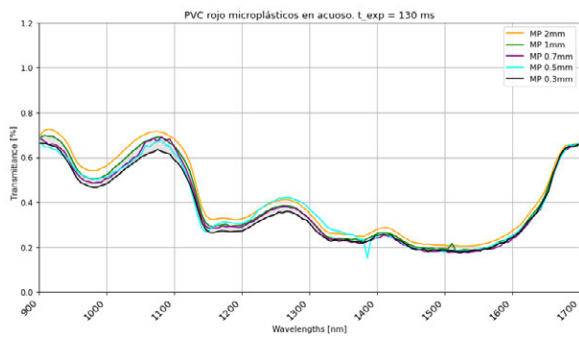


Figura A.41. Firmas espectrales PVC rojo en acuoso.

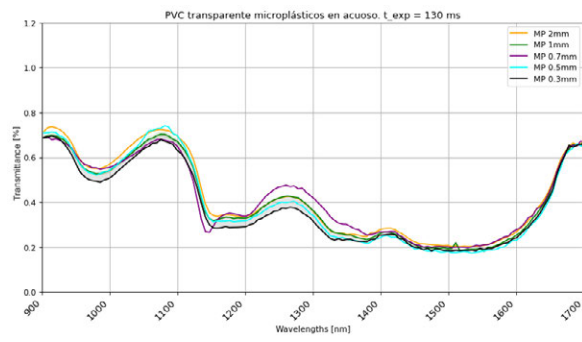


Figura A.42. Firmas espectrales PVC transparente en acuoso.

Bibliografía

- [1] T. Scientific, “Análisis de microplásticos mediante FTIR y Raman,” 2021, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.thermofisher.com/es/es/home/industrial/environmental/environmental-contaminant-analysis/microplastics-analysis.html>.
- [2] Z. Chunmao, Y. Kanaya, M. Tsuchiya et al., “Optimization of a hyperspectral imaging system for rapid detection of microplastics down to 100 μm ,” 2020, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016120303952>.
- [3] J. Shan, J. Zhao, Y. Zhang, L. Liu, F. Wu y X. Wang, “Simple and rapid detection of microplastics in seawater using hyperspectral imaging technology,” 2019, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267018313461>.
- [4] Z. Chunmao, Y. Kanaya, R. Nakajima et al., “Characterization of microplastics on filter substrates based on hyperspectral imaging: Laboratory assessments,” 2020, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749119360166>.
- [5] L. Parker, “¿Qué daños producen los microplásticos para el ser humano?,” 2022, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/danos-producen-microplasticos-salud-personas>.
- [6] D. Carrington, “Plastic fibres found in tap water around the world, study reveals,” 2017, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.theguardian.com/environment/2017/sep/06/plastic-fibres-found-tap-water-around-world-study-reveals>.
- [7] M. Halicek, H. Fabelo, S. Ortega, G. M. Callico y B. Fei, “In-Vivo and Ex-Vivo Tissue Analysis through Hyperspectral Imaging Techniques: Revealing the Invisible Features of Cancer,” 2019, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6627361/>.
- [8] C. Ser, “Un estudio sugiere que el hallazgo de microplásticos en testículos puede estar relacionado con la disminución de espermatozoides,” 2024, Consultado en junio de 2024. dirección: <https://cadenaser.com/nacional/2024/05/21/un-estudio-sugiere-que->

Anexo

el-hallazgo-de-microplasticos-en-testiculos-puede-estar-relacionado-con-la-disminucion-de-espermatozoides-cadena-ser/.

- [9] rockymountainlabs, “Difference between FTIR and Raman Spectroscopy,” 2023, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://rockymountainlabs.com/difference-between-ftir-and-raman-spectroscopy/>.
- [10] T. Scientific, “Academia de espectroscopía FTIR,” 2021, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.thermofisher.com/es/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/molecular-spectroscopy/fourier-transform-infrared-spectroscopy/resources/ftir-spectroscopy-academy.html>.
- [11] G. Alava, “APLICACIONES HIPERESPECTRALES,” 2024, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen/camaras-hiperespectrales/aplicaciones-hiperespectrales/>.
- [12] L. van den Bosch, “Hyper- and multispectral imaging,” 2021, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://collab.dvb.bayern/display/TUMzfp/Hyper-+and+multispectral+imaging>.
- [13] X. Qingsheng, Y. Guiting, L. Fengqin y D. Yang, “Fluorescent labelling combined with confocal differential Raman spectroscopy to detect microplastics in seawater,” 2024, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386142524007571>.
- [14] Sidmar, “Redes cónicas de plancton,” Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.sidmar.es/Redes-conicas-plancton.html>.
- [15] A. Booth, S. Kubowicz, C. Beegle-Krause et al., “Microplastic in global and Norwegian marine environments: Distributions, degradation mechanisms and transport,” 2017, Consultado en enero de 2024. dirección: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m918/m918.pdf>.
- [16] S. Vortmann, D. Remy, J. Klasmeier y M. Beeken, “Student Experiments on the Topic of Micro-plastics in the Environment for Secondary Education Level II: The Coffee Pad Machine Experiment and Sediment Analysis,” 2019, Consultado en febrero de 2024. dirección: <https://pubs.sciepub.com/wjce/7/2/9/>.
- [17] H. Boettcher, T. Kukulka y J. H. Cohen, “Methods for controlled preparation and dosing of microplastic fragments in bioassays,” 2023, Consultado en febrero de 2024. dirección: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-32250-y>.
- [18] C. Musso, “FORMATO RAW: ¿QUÉ ES Y CUÁNDO DEBERÍAS UTILIZARLO?,” 2011, Consultado en febrero de 2024. dirección: <https://www.blogdelfotografo.com/fotos-en-formato-raw-como-sacarle-todo-el-jugo/>.
- [19] E. Tsaqib, “Hyperspectral Image Preprocessing with Python,” 2015, Consultado en marzo de 2024. dirección: <https://eufat.github.io/2019/02/19/hyperspectral-image-preprocessing-with-python.html>.

- [20] P. Headwall, "Illumination," 2023, Consultado en junio de 2024. dirección: <https://headwallphotonics.com/products/machine-vision-accessories/illumination/>.
- [21] V. S. INC, "500W HALOGEN LIGHT MANUAL DUAL LIGHTS FIBER OPTIC ILLUMINATOR ML02311411," Consultado en junio de 2024. dirección: <https://viewsolutionsinc.com/500w-halogen-light-manual-fiber-optic-illuminator-ml02311411/>.
- [22] F. Scientific, "Thermo Scientific™ Placas de poliestireno de 96 pocillos Pierce™, muesca en la esquina," Consultado en junio de 2024. dirección: <https://www.fishersci.es/shop/products/pierce-96-well-microplates-1/10563364>.
- [23] H. Yu-Jhen, H. Chihchi y L. Mengshan, "Unveiling microplastic spectral signatures under weathering and digestive environments through shortwave infrared hyperspectral sensing," 2024, Consultado en abril de 2024. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123021085>.
- [24] H. Masoumi y S. M. Safavi, "Identification and classification of plastic resins using near infrared reflectance spectroscopy," 2012, Consultado en abril de 2024. dirección: https://www.researchgate.net/publication/285330830_Identification_and_classification_of_plastic_resins_using_near_infrared_reflectance_spectroscopy.
- [25] Iberdrola, "¿Cómo nos afectan los microplásticos?," 2022, Consultado en febrero de 2024. dirección: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/microplasticos-amenaza-para-la-salud>.
- [26] ONU, "La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible," 2019, Consultado en junio de 2024. dirección: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

