



universidad
de león



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

**APLICACIONES DE LA RADIOMETRÍA EN LAS
CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**APPLICATIONS OF RADIOMETRY IN BIOLOGICAL
SCIENCES**

Autor: Francisco Romero Pascual

GRADO EN BIOLOGÍA

Julio, 2020

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
3. Base científica de la radiometría	3
3.1. Fundamento teórico de la radiometría	3
3.1.1 Ley de Wien	3
3.1.2 Ley de Stefan-Boltzmann	4
3.2. Funcionamiento de las cámaras termográficas	6
4. Estudio bibliométrico de la radiometría en las ciencias biológicas	9
5. Principales usos de la radiometría infrarroja en Biología	16
5.1 Usos en ecología	16
5.2 Usos en genética y genómica	22
5.3 Usos en agricultura	23
5.4 Usos en biología molecular, bioquímica, biotecnología y biomedicina	24
5.5 Otras áreas de aplicación	25
6. Conclusiones	27
7. Referencias	28

Resumen

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es dar a conocer la importancia y evolución de la radiometría, así como sus numerosas aplicaciones en las distintas ramas de la Biología. En primer lugar, se introducirá la ciencia en sí misma, acercándonos a su origen, desarrollo y principios sobre los que se asienta. Se conocerán las principales leyes físicas en las que se basa y el tipo de tecnología empleado en la actualidad. Se hará uso del análisis bibliométrico para asignar cifras a los objetivos y visualizar de manera sencilla los resultados en forma de gráficas y tablas. De esta manera, se podrá conocer la evolución de la ciencia durante las últimas dos décadas, distinguir las áreas biológicas que más se han beneficiado de sus aplicaciones y dar una imagen general de sus posibles usos a través de ejemplos extraídos de diferentes estudios en ecología, microbiología, agricultura y biología molecular, entre otros. Con los resultados obtenidos, este trabajo logra dar a conocer la ciencia de la radiometría y la diversidad de sus aplicaciones desde un punto de vista biológico, con el fin de mostrar las posibilidades que esta ciencia ofrece en el presente y podrá ofrecer en el futuro.

Palabras clave: aplicaciones, biología, estudio bibliométrico, radiometría, relevancia

Abstract

The main objective of this study is to show the importance and evolution of radiometry, as well as its many applications in the different fields of biology. First, the science itself will be introduced, bringing us closer to its origin, development and the principles on which it is founded. Then, the main laws of physics on which radiology is based and the type of technology currently employed will be illustrated. Bibliometric analysis will be used in order to transform the objectives into figures and, thus, easily visualize the results in the form of graphs and tables. In this regard, it will be possible to explain the evolution of this science during the last two decades, distinguish the biological areas that have benefitted the most from its applications and give a general image of its possible uses through examples taken from different studies in ecology, microbiology, agriculture and molecular biology, among others. The results obtained in this study allow us to publicize the science of radiometry and the diversity of its applications from a biological point of view in order to show the possibilities that this science offers in the present and may offer in the future.

Keywords: applications, biology, bibliometric study, radiometry, relevance

1. INTRODUCCIÓN

Entendemos por radiometría la parte de la Física que trata sobre la medición de la intensidad de las radiaciones electromagnéticas. Esta se encarga de todas las longitudes de onda del espectro, de 0,01 a 1.000 micrómetros; midiéndolas cuantitativamente y transformando parte de esa radiación en calor o en señales eléctricas, fácilmente representables.

Maxwell (1831-1879), Stefan (1844-1893), Boltzmann (1844-1906), Planck (1858-1947) y Einstein (1879-1955) son algunos de los grandes científicos asociados a esta ciencia. Todos ellos pertenecen a los siglos XIX o XX, por lo que se puede considerar una ciencia reciente, aunque bastante desarrollada.

Aunque todos hicieron diferentes aportaciones, gracias a las famosas “20 ecuaciones de Maxwell”, se considera a este mismo como el padre de la radiometría, ya que unificó la electricidad, el magnetismo y la luz como diferentes manifestaciones de un único fenómeno: el electromagnetismo. Estas son consideradas como “la segunda gran unificación de la física”, siendo la primera fruto del trabajo de Isaac Newton.

Como podrá apreciarse a lo largo de este trabajo, la radiometría abarca desde las ondas de radio a los rayos X y gamma, pasando por las microondas, radiación infrarroja y luz visible. Las posibles aplicaciones de la radiometría han sido tan variadas como áreas tiene la ciencia, sirviendo en la mayoría de los casos como herramienta de medida, dando la oportunidad de poner cifras y valores cuantitativos a características que hace años se desconocía que podían ser medidas. En otras ocasiones, ha permitido desarrollar tratamientos específicos contra enfermedades como el cáncer o crear numerosa y sofisticada tecnología con fines militares y/o de investigación. La radiación térmica y su capacidad de medición no intrusiva, las aplicaciones de los rayos X y gamma a la medicina e investigación, microondas y ondas de radio y televisión para la transmisión de información o el famoso magnetrón del horno microondas, presente en todos los hogares del mundo, etc.

Este trabajo tratará de dar a conocer o recopilar las aplicaciones de la radiometría aprovechadas por las distintas áreas de la Biología. Su división en apartados introducirá al concepto de la materia e irá abriendo camino a medida que descubrimos sus implicaciones tecnológicas y biológicas; siendo el objetivo final conocer la importancia de esta, tanto en el área que nos compete como para la ciencia en general.

2. OBJETIVOS

La división de este trabajo está hecha con el fin de mostrar la participación de la radiometría como ciencia aplicada a la Biología. Para ello, el Apartado 3 explica la base científica y las características básicas que conforman esta ciencia, así como las leyes en las que está basada la tecnología que usamos en la actualidad.

Con ayuda del análisis bibliométrico, se evaluará la importancia de esta técnica en la comunidad científica actual. Se mostrarán datos en forma de gráficas con el fin de interpretar su evolución anual, así como la participación e importancia en las diferentes áreas de la Biología (Apartado 4).

Con la información obtenida en el apartado anterior, se evaluarán las principales aplicaciones de la radiometría en las ciencias biológicas. También se comentarán ejemplos de las áreas que más relevancia han obtenido y algunos otros ejemplos que se consideren remarcables o interesantes por su novedad o implicación tecnológica (Apartado 5).

El objetivo final de este trabajo consiste en mostrar un punto de vista global de la ciencia e indagar sobre su parte implicada en la Biología y ver cómo ha ayudado al desarrollo de numerosas técnicas y aplicaciones.

3. BASE CIENTÍFICA DE LA RADIOMETRÍA

Todos los cuerpos que se encuentran a temperatura superior a cero absoluto emiten radiación, la cual se presenta en diferentes longitudes de onda a lo largo del espectro electromagnético, siendo su emisión mayor mientras más calientes se encuentren (Gómez González, 2006). Esto se debe a la oscilación de sus moléculas, y un cambio en la temperatura de un objeto siempre estará acompañado de un cambio en la intensidad de su radiación. La radiometría es la ciencia encargada de medir esa energía irradiada con la ayuda de las diferentes magnitudes radiométricas:

Tabla 1. Principales magnitudes radiométricas implicadas en la radiometría (Gómez González, 2006).

Magnitud	Símbolo	Unidad
Energía radiante	Q_e	Julio (J)
Flujo radiante/luminoso	Φ	Vatio (W)
Incidencia radiante o Irradiancia	E_e	$W/(m^2 \mu m)$
Intensidad radiante	I_e	$W/(m^2 \mu m sr)$
Radiancia	L_e	$W/(m^2 \mu m sr)$

Esta energía radiante no puede medirse cuantitativamente de manera directa, por lo que suele convertirse en alguna otra forma de energía, como es el caso de la energía eléctrica, térmica o química (Stillman, 2002).

En este caso concreto se trabaja con el espectro infrarrojo, que comprende longitudes de onda entre los 700 nm y 100 μm . Sin embargo, es necesario destacar que la radiación térmica no es exclusiva del espectro infrarrojo, si no que comprende desde el ultravioleta hasta el infrarrojo con mayor intensidad en el espectro visible.

3.1. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA RADIOMETRÍA

3.1.1 Ley de Wien

Otro aspecto de gran importancia para comprender la radiometría es la Ley de Wien, de donde deducimos que cuando aumenta la temperatura de un cuerpo negro, aumenta la energía radiada general, y el pico de la curva de radiación se mueve hacia longitudes de ondas más cortas (Williams, 2001).

La Ley de desplazamiento de Wien establece una relación inversa entre esa longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura. Esto nos es útil para determinar la temperatura de objetos radiantes calientes tales como las estrellas y incluso para determinar la temperatura de cualquier objeto radiante cuya temperatura sea superior a la de su entorno.

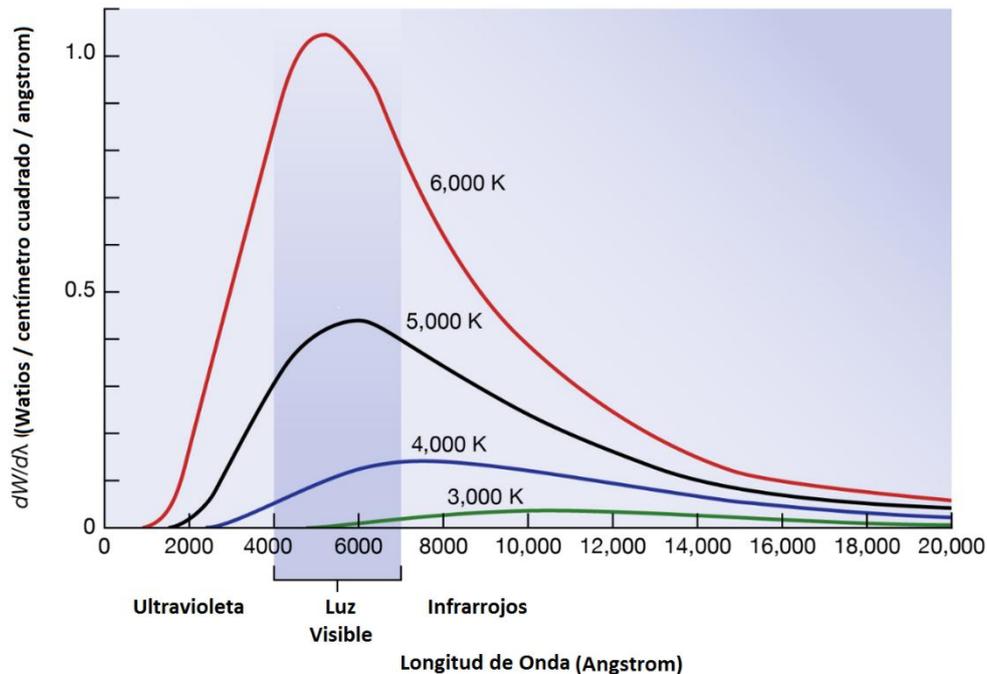


Figura 1. Energía electromagnética dW emitida por unidad de área y por segundo en un intervalo de longitud de onda, $d\lambda = 1$ angstrom, por un cuerpo negro a varias temperaturas entre 3.000 y 6.000 K en función de la longitud de onda. El rango de luz visible está representado por la barra entre corchetes. La longitud de onda del pico cambia con la temperatura de acuerdo con la ley de Wien (Fritzsche, 2016).

3.1.2 Ley de Stefan-Boltzmann

Si analizamos un cuerpo negro, toda la radiación que emite será generada debido a su propia temperatura y no reflejada de otras fuentes externas. Según la ley de Stefan-Boltzmann todo cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia proporcional a su temperatura.

$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4)$$

Esta ley proporcionará la tasa con la que un objeto a temperatura T , irradia energía. Donde A es el área de la superficie del objeto, T es la temperatura absoluta de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$ (Olmo y Nave, sin fecha).

Para objetos suficientemente calientes, una parte de esa radiación se encuentra en el espectro de luz visible, lo que permite ver ese efecto a simple vista. Este es el caso de los metales, que comienzan a emitir energía en forma de brillo cuando alcanzan altas temperaturas. También lo podemos sentir fácilmente con una simple bombilla halógena o una pequeña llama, las cuales aumentarán su temperatura (y la del entorno) de forma proporcional a la radiación que estén emitiendo (Wellons, 2007).

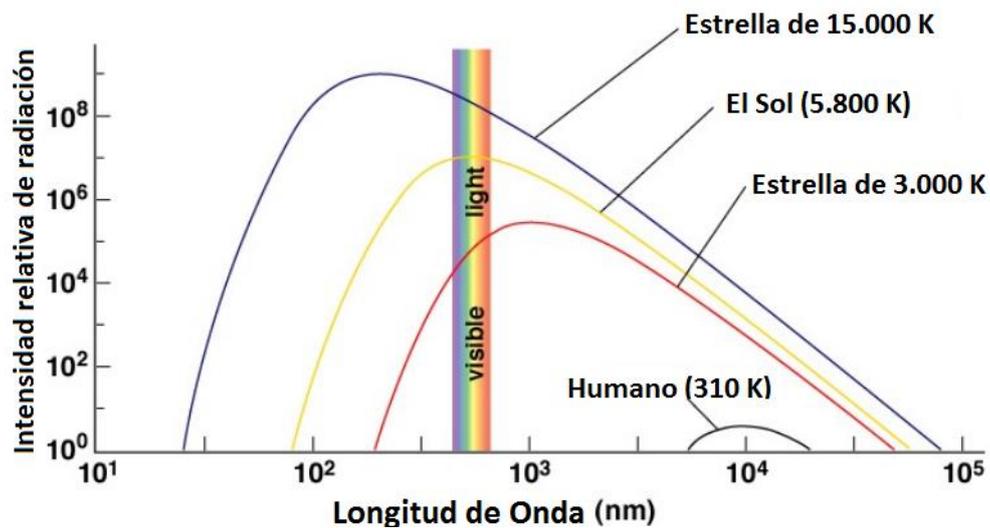


Figura 2. Radiación térmica emitida por varios objetos de referencia. Los objetos más calientes emiten longitudes de onda más cortas. Gran parte de esa energía no es emitida como luz visible (Wellons, 2007).

Cuando el fenómeno no es visible a simple vista, las cámaras termográficas nos ayudan a medir la emisividad de los cuerpos y, según la ecuación de Stefan-Boltzmann, midiendo la potencia de la radiación que emite un cuerpo podemos llegar a determinar cuál es su temperatura.

En la emisión de radiación infrarroja, además de la temperatura, influye la emisividad del material, la cual depende completamente del material del propio objeto (las propiedades físicas del mismo como la rugosidad de la superficie) y estará limitada a 1 para un cuerpo negro ideal (Wellons, 2007).

Con las nociones básicas sobre la radiometría y conociendo su potencial casi “infinito” como herramienta de medida, cualquier objeto por encima del ya mencionado “0 absoluto” tiene la capacidad de ser medido. Esto da la posibilidad de aplicar esta ciencia a casi cualquier campo de investigación como instrumento de medición, como veremos a lo largo de este trabajo.

3.2. FUNCIONAMIENTO DE LAS CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

Las imágenes obtenidas mediante el uso de cámaras infrarrojas nos informan sobre la radiación infrarroja que emite un determinado cuerpo. Esa energía en forma de radiación es medida por un sensor integrado en la cámara, el cual está calibrado para una longitud de onda concreta. La cámara traduce esa información en imagen mediante un software básico para imágenes térmicas que se basa en la temperatura media, máxima y mínima (Ring, 2010).

En la Figura 3 podemos observar, en una de las múltiples aplicaciones de la tecnología termográfica, la escala de colores utilizada para la representación gráfica de la temperatura palmar. En ese caso concreto, esta tecnología ayudaría a identificar un posible problema de riego sanguíneo en el cuarto y quinto dedo.

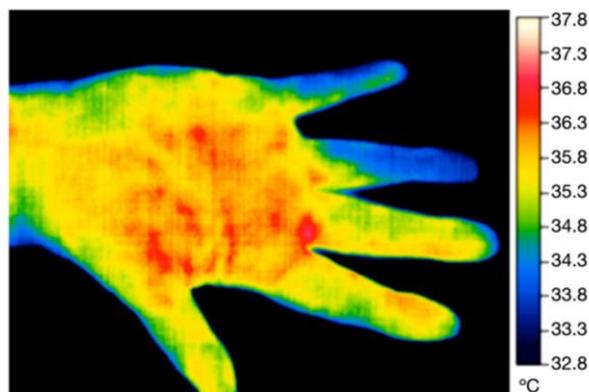


Figura 3. Vista palmar de la mano que muestra los dedos cuarto y quinto con una menor temperatura (Ring, 2010).

Para que este proceso sea posible, las partes esenciales de una cámara infrarroja de termografía son las siguientes (Williams, 2009):

- **Sensor óptico infrarrojo** que capte la imagen externa en el rango de longitud de onda térmica.
- Uno o más **detectores/convertidores** capaces de transformar esa radiación en señales eléctricas proporcionales.
- **Sistema de escaneo** de la imagen térmica.
- **Procesador** que una la información del detector y el scanner; convirtiéndolas en señal de vídeo.
- **Pantalla** que genere una imagen de esa señal visual.

“La óptica de la cámara hace converger sobre su detector la radiación infrarroja que emite el objeto bajo estudio, obtiene una respuesta (cambio de tensión o resistencia eléctrica) que será leída por los elementos electrónicos (la placa electrónica) de la cámara. Esa señal electrónica es convertida en una imagen electrónica en la pantalla, donde los distintos tonos de color se corresponden con distintas señales de radiación infrarroja procedentes del objeto de estudio” (Melgosa Revillas, 2011, p. 27).

El sensor infrarrojo que contiene la cámara no es más que un dispositivo fotoeléctrico de material piroeléctrico a través del cual entra la radiación electromagnética de la longitud a la que se haya calibrado. Este material está hecho de una pequeña lámina de Nitrato de galio o Cesio, encontrándose en distintas configuraciones de 1,2, o 4 píxeles. En muchas ocasiones, esos píxeles son utilizados con polaridades opuestas para evitar el desacoplamiento del equipo y la cancelación de incrementos de energía infrarroja.

La posibilidad de combinar un sensor óptico externo con uno de radiación hace que muchas cámaras infrarrojas también capturen imágenes visibles para combinar ambas imágenes, de modo que sea más sencillo correlacionar áreas que presenten problemas (Fluke, sin fecha).

Desde su descubrimiento por Herschel en el año 1800, el infrarrojo ha sufrido grandes cambios, sobre todo, asociados al mundo militar en los periodos de guerra. Fue a partir de los años 60 cuando comenzó a usarse en aplicaciones no militares, siendo 1966 el año en que se comercializó la primera cámara infrarroja. Hoy en día, la tecnología ha avanzado mucho y, como se ha descrito antes, la evolución y complejidad de componentes han facilitado su uso y trabajo.

Dependiendo de los detectores de ondas con los que cuentan las cámaras, pueden distinguirse dos tipos de tecnologías:

- La tecnología basada en detección termal utiliza efectos secundarios como la relación entre conductividad, capacitancia, expansión o la temperatura detectada. Es la que utilizaban los bolómetros, las termopilas, etc. Tipo de tecnología muy empleado en la actualidad y con un amplio campo de utilidad.
- La tecnología basada en detección directa traduce los fotones directamente a electrones. La carga acumulada o el cambio en la conductividad son proporcionales a la radiación de los objetos que se observen. Las cámaras basadas en esta tecnología usan muchos detectores y, exceptuando aquellas que sólo captan infrarrojos de corta longitud de onda, estos detectores necesitan ser enfriados a temperaturas criogénicas, cercanas a los -200°C. Su uso está más restringido debido a los motivos anteriores, siendo una herramienta de investigación en la mayoría de los casos.

El avance de esta tecnología ha permitido desarrollar dispositivos cada vez más compactos y eficientes, haciendo posible su montaje en una gran diversidad de plataformas. Como veremos a lo largo de los diferentes apartados, los dispositivos con estas tecnologías se han utilizado de diversas maneras: como cámaras trampa para la detección de vertebrados terrestres, vigilancia

aérea, monitorización de fugas e incluso para la lucha contra la criminalidad en forma de cámaras infrarrojas nocturnas.

Destacan las cámaras montadas en aviones no tripulados (UAV) y mini drones, cuya utilización ha dado la posibilidad de cubrir grandes superficies de terreno, además de hacerlo de manera no intrusiva y con nulo impacto para el ecosistema (Kaleem, 2018).

4. ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO DE LA RADIOMETRÍA EN LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS

La metodología de investigación aplicada en esta parte del trabajo consistirá en un análisis bibliométrico llevado a cabo a través de la búsqueda del término “radiometría” (*radiometry*) en los principales buscadores de material científico: Google Scholar, Science Direct, Springer Link y World Wide Science.

Nuestro objetivo principal será el análisis de la actividad científica relacionada con la radiometría, poniendo especial atención a su importancia en los últimos 20 años, así como sus principales usos y las diferentes ramas de la Biología en las que se aplica. Esto nos proporciona información de utilidad sobre el estado de la propia radiometría como herramienta de investigación, su visibilidad e importancia, permitiéndonos valorar la actividad científica y el impacto tanto de la investigación como de las fuentes.

La bibliometría puede aportar datos estadísticos muy completos y variados, clasificándose en dos principalmente: indicadores de actividad y de impacto. Los primeros atenderán al estado real de la ciencia, con parámetros como número y distribución de publicaciones, productividad de la ciencia, colaboración entre subdisciplinas científicas, etc. Por otro lado, entre los indicadores de impacto se encuentran la evaluación de documentos muy citados (*Hot papers*) y el factor de impacto (*FIN*). En este apartado del trabajo se utilizarán principalmente los indicadores de actividad, contando el número de artículos relacionados con la palabra radiometría en español e inglés. Una vez obtengamos los datos brutos de actividad, se elaborarán una serie de gráficas para arrojar claridad a los mismos y que la información pueda ser fácilmente visible.

Comenzaremos con las gráficas sobre las búsquedas del término en cuatro de los principales buscadores científicos. En todas ellas se presentan de la siguiente manera:

- Ordenadas: búsquedas totales del término radiometría en publicaciones
- Abscisas: año de publicación

Cabe destacar antes de su presentación, la principal diferencia que habrá entre los valores de la gráfica de Google Scholar (diez veces superiores en número) con respecto a las demás. En este buscador, los resultados nos aparecían como “búsquedas relacionadas” del propio término, no sólo los artículos y publicaciones concretas del mismo. Esto nos sirve para discernir entre los datos arrojados por los otros tres buscadores, los cuales solo ofrecen datos sobre artículos y

publicaciones del tema en concreto. Como dato significativo, cabe mencionar la fecha en la que se realizaron las búsquedas (06/05/2020), como explicación a los bajos resultados que presentará el año en curso.

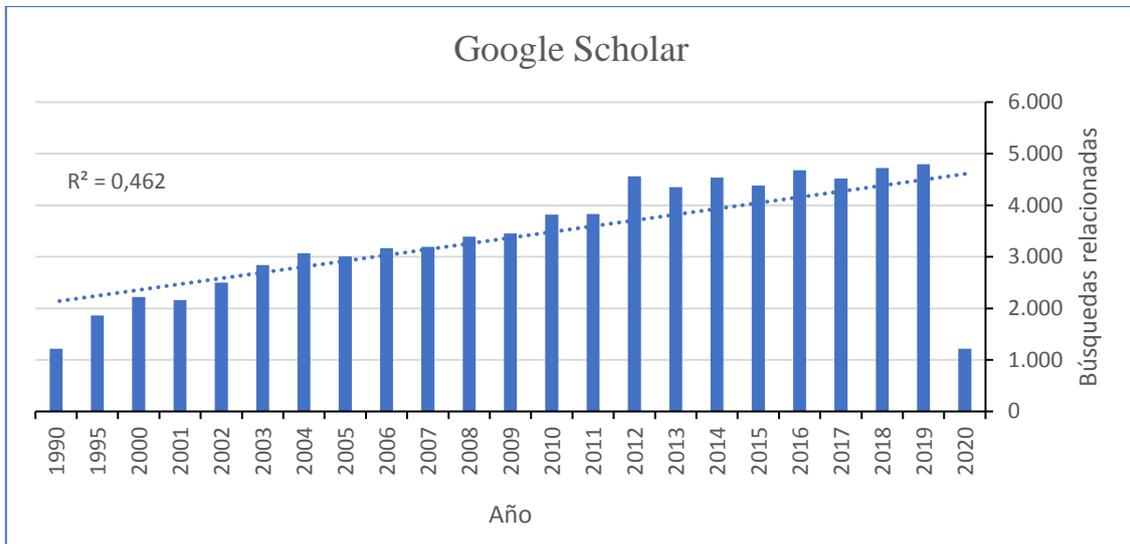


Figura 4. Gráfica de las búsquedas relacionadas con el término radiometría por año de búsqueda. Se le ha agregado línea de tendencia y valor de R^2 .

En esta primera gráfica (Figura 4) se pueden observar los resultados de la búsqueda en Google Scholar. Como se ha dicho anteriormente, los datos de 2020 son puntualmente inferiores debido a que las búsquedas se realizaron a principios de mayo, a falta de ocho meses para terminar el año. Se puede observar una **tendencia claramente positiva** en la aparición del término radiometría a medida que avanzan los años. El interés general sobre esta ciencia llega a aumentar hasta en un 16% entre 2001 y 2002, o un 19% entre 2011 y 2012. De media el **aumento es del 7% año tras año**, pasando de unas 2.200 búsquedas relacionadas en el año 2.000 hasta las casi 5.000 del año 2019. La línea de tendencia resume de forma rápida el aumento previamente descrito y nos permite observar sobre qué valores se moverían los datos de 2020. Mientras que R^2 señala que existe una relación media entre ambos valores.

La siguiente gráfica (Figura 5) nos dará información sobre Science Direct, plataforma líder en literatura científica revisada por pares. Será la segunda que observemos y la primera de las tres restantes que solamente mostrará los artículos o *papers*, publicaciones, libros o textos sobre radiometría *per se*.

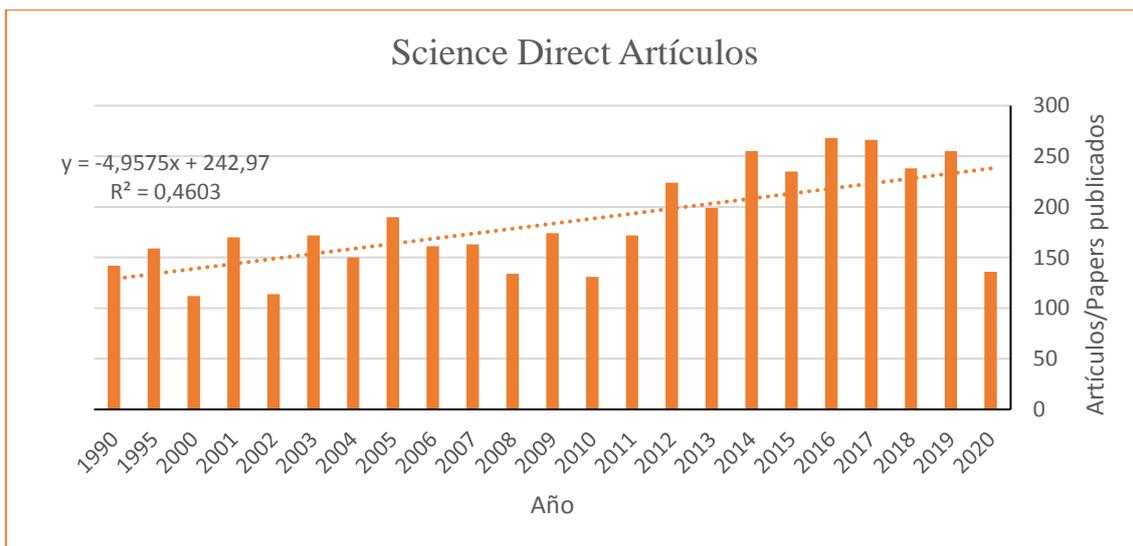


Figura 5. Gráfica sobre artículos y papers publicados sobre radiometría por año. Se le ha agregado línea de tendencia y valor de R².

Como en el caso de la gráfica anterior, puede apreciarse de nuevo una clara **tendencia positiva** con el aumento de los años. Una de las principales diferencias es la desigualdad de la serie de datos que, aunque se mantiene en alza, intercala años de aumento con años de disminución del número de publicaciones. Esto se pone en evidencia en momentos como el periodo entre 2000 y 2003, donde los valores oscilan entre el 50% en aumento y el 30% en disminución de manera repetida. Siguiendo ese patrón, aunque de forma menos acentuada, obtenemos un valor medio del 6% de incremento por año en el número de publicaciones sobre radiometría, **esperando un valor muy alto en el 2020** (en torno a las 350-400) si la tendencia se cumpliera.

La tercera gráfica (Figura 6) nos dará información sobre el buscador Springer Link, el cual deja filtrar por tipo de texto científico a buscar. Los resultados de las búsquedas obtenidas fueron para artículos, libros y capítulos de libros y papers de conferencias. Durante el trabajo realizado con este buscador, también se notó la **alternancia entre años de subida y bajada en número total de artículos**. Se pudieron observar dos grandes subidas de interés en torno al 20% en los años 2012 y 2014, alternados por un año de bajada de casi el mismo nivel, que, como hemos dicho, es una característica recurrente en estas gráficas. Este buscador también presenta unos valores positivos en cuanto al número de artículos totales de radiometría por año, siendo en este caso del 5%, valor muy parecido a los encontrados en los dos anteriores trabajos de búsqueda.

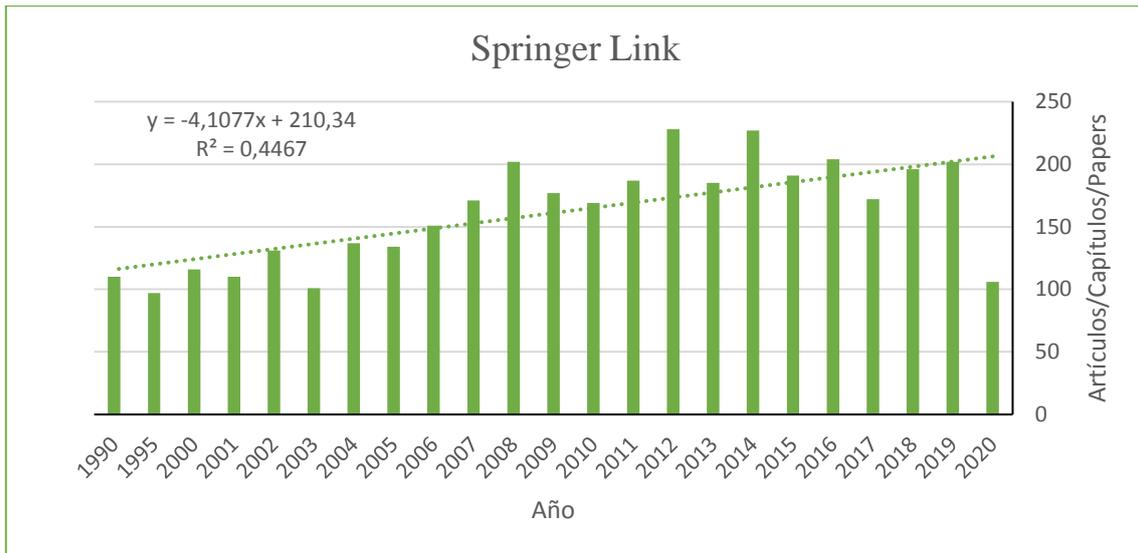


Figura 6. Gráfica de publicaciones por año en el buscador Springer Link. Se presentan la línea de tendencia y el valor R².

Como hemos dicho anteriormente, la línea de tendencia nos ayuda a ver de forma rápida y sencilla el valor positivo en número de publicaciones por año.

Para terminar, se realizó el mismo proceso con el último motor de búsqueda, en este caso WorldWideScience (Figura 7). Este aportó datos un tanto diferentes, pero con el mismo resultado general. En este caso se puede observar un gran incremento en el número de publicaciones a partir del año 2016, incrementándose un 60% ese mismo año y un 40% en el 2018.

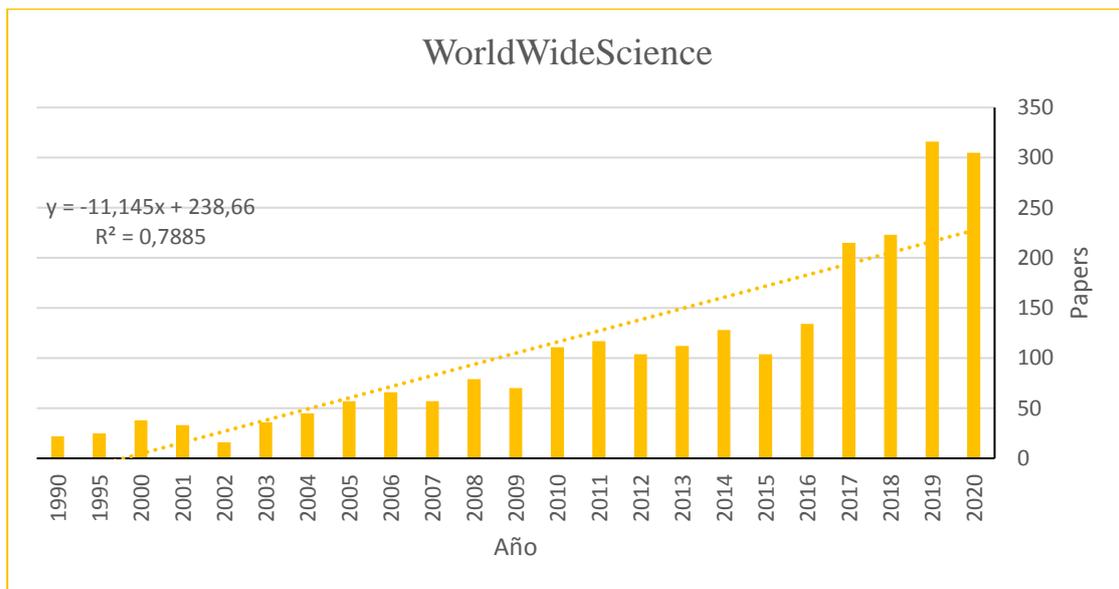


Figura 7. Gráfica de *papers* sobre radiometría publicados por año según WorldWideScience. Se incluyen línea de tendencia y valor R²

Sin embargo, el dato más interesante lo aporta el año en curso, el cual presenta casi el mismo número de publicaciones en cuatro meses que en todo 2019. Debido a lo descrito anteriormente, la línea de tendencia presenta un incremento más acentuado que las anteriores gráficas y el **número de publicaciones por año aumenta de media un 19%**. Aunque sigue presentando valores con muchos altibajos, su tendencia es ascendente al igual que todos los ejemplos anteriores.

Para poner cifra como conclusión, se ponderaron los datos globales de los cuatro buscadores con un **previsible resultado positivo de en torno al 9-10% de aumento** en el número de publicaciones globales sobre nuestra ciencia a tratar.

Dejando atrás la radiometría en sí misma, volvimos a realizar una búsqueda, pero esta vez por las principales áreas de la Biología, con el fin de averiguar en cuáles de ellas tiene más utilidad y es más frecuentemente usada. La metodología para esta segunda parte fue similar a la descrita anteriormente, salvo que se usaron solo Google Scholar y SpringerLink como motores de búsqueda. Esto es debido a que fueron los únicos que dejaban filtrar por tema y año al mismo tiempo, facilitando así el trabajo. La principal diferencia entre las gráficas vuelve a ser la cantidad de resultados arrojados, debido al mismo motivo que las diferenciaba en el anterior apartado: Google Scholar realiza búsquedas relacionadas totales, mientras que SpringerLink en este caso, tan solo nos muestra los artículos y libros de ese tema concreto.

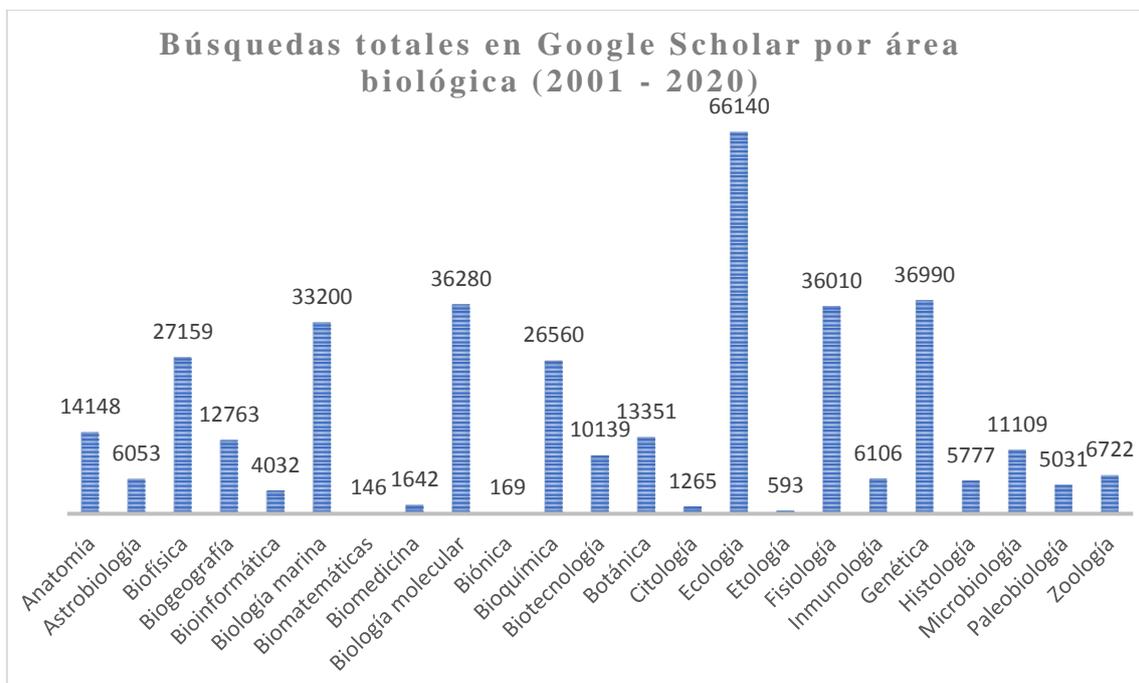


Figura 8. Búsquedas totales de Google Scholar por área biológica durante el periodo 2001-2020

Como puede observarse en la Figura 8, los resultados de Google nos dan una idea bastante clara de cuáles son las ciencias más interesadas en las diferentes aplicaciones de la radiometría. Destacamos la **ecología** frente al resto, con unos 66.100 resultados, diez veces más que la media y el doble que el resto de las ciencias a destacar. Seguidamente aparecen: **genética, biología molecular, fisiología y biología marina** con una media de 33.000 a 36.000 resultados y, por último, **biofísica y bioquímica**, con alrededor de 27.000 resultados. Finalmente, destacaremos **anatomía, biogeografía, biotecnología, botánica y microbiología**, con resultados que rondan las 12.000 búsquedas.

La segunda parte se corresponde con el mismo proceso, pero con el buscador SpringerLink (Figura 9). Como hemos dicho anteriormente, este nos da el número de artículos científicos totales del tema/área buscada, por lo que los resultados son mucho menores en número que las búsquedas totales de Google. En este caso las ciencias a destacar son las mismas salvo por la **bioinformática**, que sustituye a la **biología molecular**. En este caso, la ciencia que sobrepasa a las demás en número de publicaciones es la **fisiología**, seguido de la **biología marina** y **ecología**, con **genética** y **anatomía** cerca. Con algunas variaciones, los resultados en ambos casos se presentan muy similares, por lo que usaremos esas doce áreas biológicas para realizar la última parte de este estudio bibliométrico.

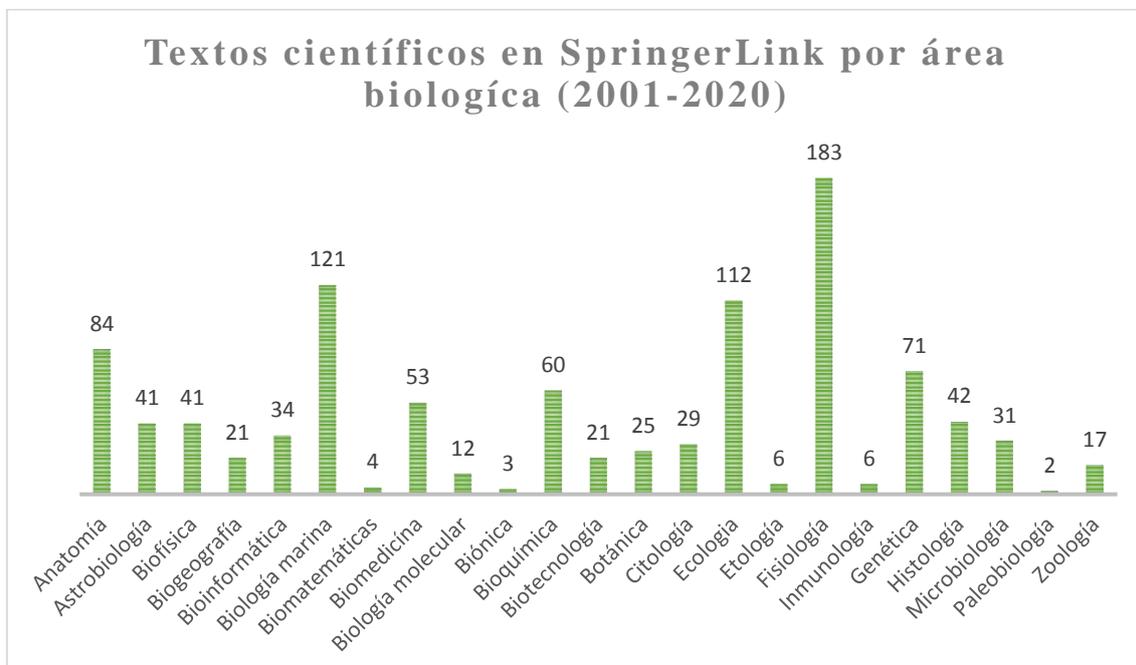


Figura 9. Textos científicos totales por áreas biológicas entre 2001-2020 encontrados por SpringerLink.

Aunque el resto de ciencias biológicas también hacen aparición, hemos destacado esas 12 para hacer el siguiente análisis de evolución por años. Se procederá con los resultados obtenidos en

ambos buscadores con el fin de saber qué áreas han visto un mayor incremento en búsquedas y artículos relacionados a lo largo de las dos últimas décadas.

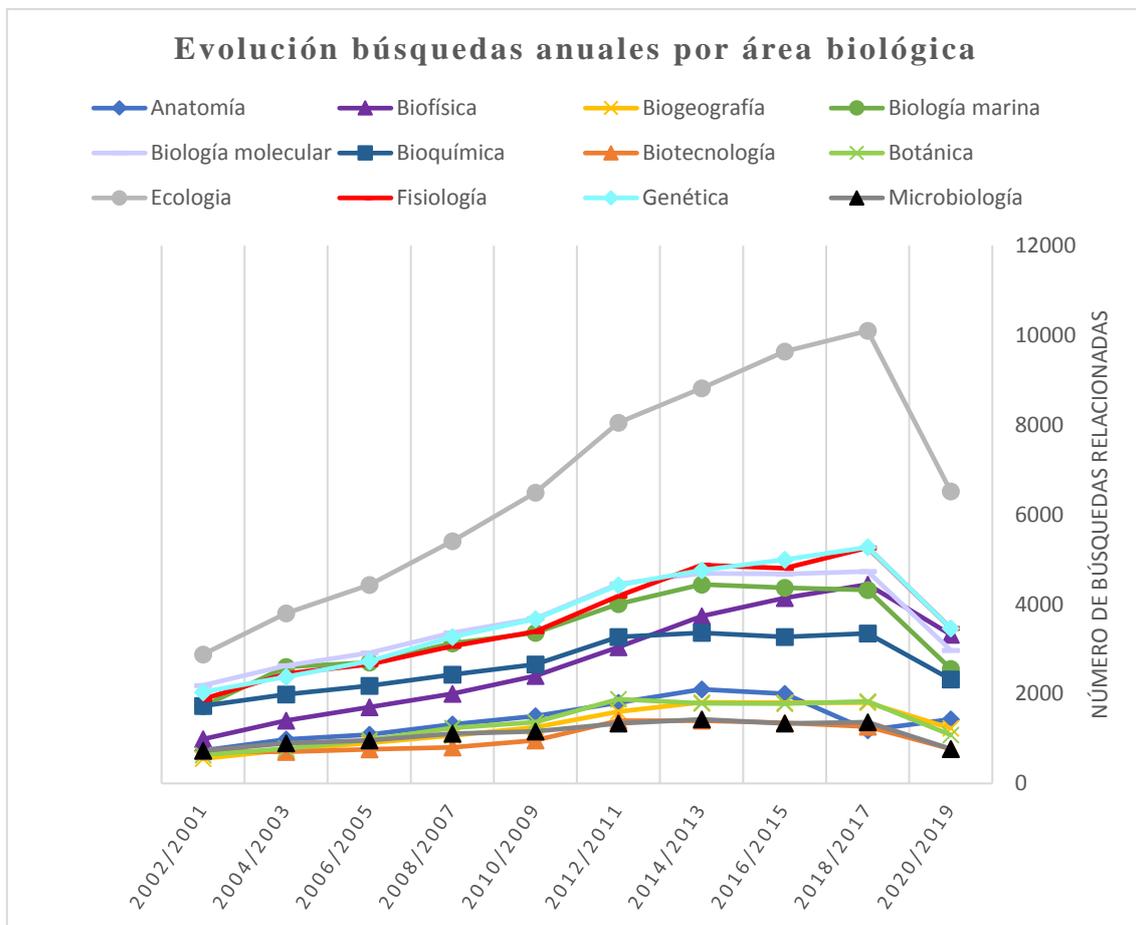


Figura 10. Gráfica de evolución anual de búsquedas sobre la radiometría aplicada a diferentes áreas biológicas.

Esta última gráfica (Figura 10) representa esa evolución anual en la que se puede observar el aumento en interés sobre la radiometría en las diferentes ramas de la Biología. Casi todas siguen un mismo patrón ascendente, con mayor o menor crecimiento, salvo en casos como **anatomía, microbiología, biogeografía y botánica**, entre otras. Como era de esperar, las áreas que más resultados generales consiguieron en los análisis anteriores, también han conseguido mantenerse como las de mayor crecimiento: **ecología, genética, fisiología, biología marina y biofísica**.

5. PRINCIPALES USOS DE LA RADIOMETRÍA INFRARROJA EN BIOLOGÍA

5.1. USOS EN ECOLOGÍA

La rama de la Biología que más diversidad de aplicaciones ha presentado ha sido la ecología. El uso de la tecnología infrarroja da la posibilidad de obtener información adicional y de gran valor cuando los métodos habituales no permiten una medición correcta o eficiente del medio. Según Franko *et al.*, 2011, desde hace más de dos décadas, existe una gran cantidad de estudios de esta rama que se han pasado a realizar con esta tecnología casi de manera exclusiva como es el caso de

- Estudios sobre contaminación térmica del agua (Ali *et al.*, 2011)
- Monitoreo y control de incendios forestales (Saranya *et al.*, 2014; Chuvieco *et al.*, 2020)
- Seguimiento de los gases emitidos por vertederos y el compostaje (Mønster *et al.*, 2014)
- Fugas de gas (Kasai *et al.*, 2010)
- Detección de animales y estimación del tamaño de la población. (Cilulko *et al.*, 2012; Horton *et al.*, 2017; Belda *et al.*, 2020)

Como ejemplo de algunos de estos casos, podemos encontrar el estudio del aumento de temperatura en los estanques de agua causada por un flujo de agua insuficiente o interrumpido. Esta técnica es una de las herramientas de prueba no destructivas que predicen la difusión de calor sin alterar el flujo de fluido ni su dirección (Ali *et al.*, 2011).

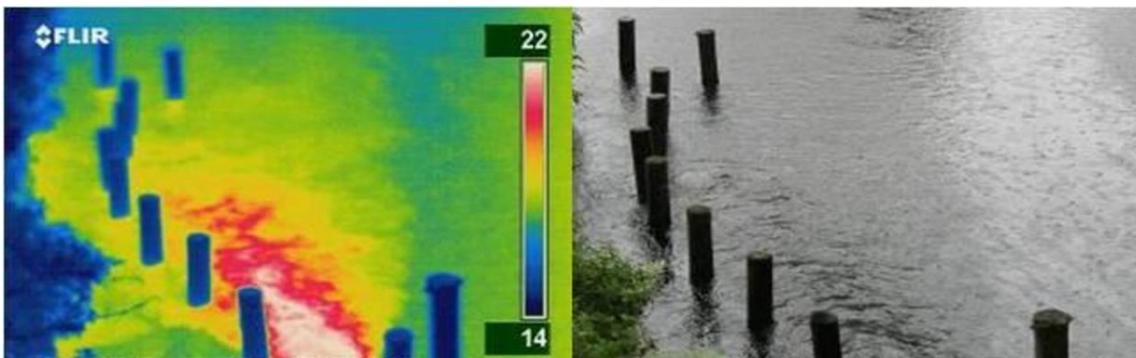


Figura 11. Imagen térmica (izq.) y digital (dcha.) de un vertido de aguas termales a un canal (Ali *et al.*, 2011).

Esto supone un potencial peligro para las poblaciones de animales y plantas del ecosistema. Con la ayuda de esta técnica, este peligro puede evitarse conociendo la causa del problema sin alterar el entorno.

El lanzamiento del satélite Landsat en 1972, con su novedosa tecnología térmica infrarroja (TIRS) para su época, marcó un gran avance en la gestión de los incendios. Permitted controlar estos fenómenos naturales antes de que se produjesen, permitiendo así estimar el potencial peligro de incendio en un área. Sirvió y sirve para detectar incendios activos en zonas de difícil acceso, comprender el comportamiento de los incendios y después de que se produzcan, analizar los efectos del fuego y la recuperación de la vegetación. Actualmente, la teledetección ha avanzado y contribuido mucho a la ciencia de los incendios forestales, el uso de espectralradiómetros terrestres, cámaras montadas en helicópteros, aviones y vehículos aéreos no tripulados e incluso satélites dedicados exclusivamente a estas actividades, con el desarrollo a la par de la tecnología de software de interpretación (Chuvienco *et al.*, 2020).

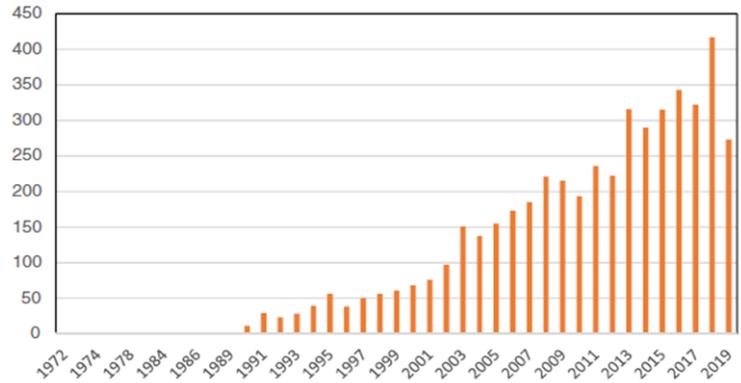


Figura 12. Gráfico de publicaciones sobre Teledetección de fuegos en World of Science desde 1972 (Chuvienco *et al.*, 2020).

En el estudio de Saranya *et al.*, 2014 (Figura 13), podemos observar un ejemplo del uso de estas técnicas para monitorizar durante dos décadas los fuegos forestales de una zona de la India a través de características clave como el tipo de vegetación, la biomasa, el análisis espacial de zonas de riesgo, la tasa de regeneración tras los fuegos y la progresión del área quemada del bosque.

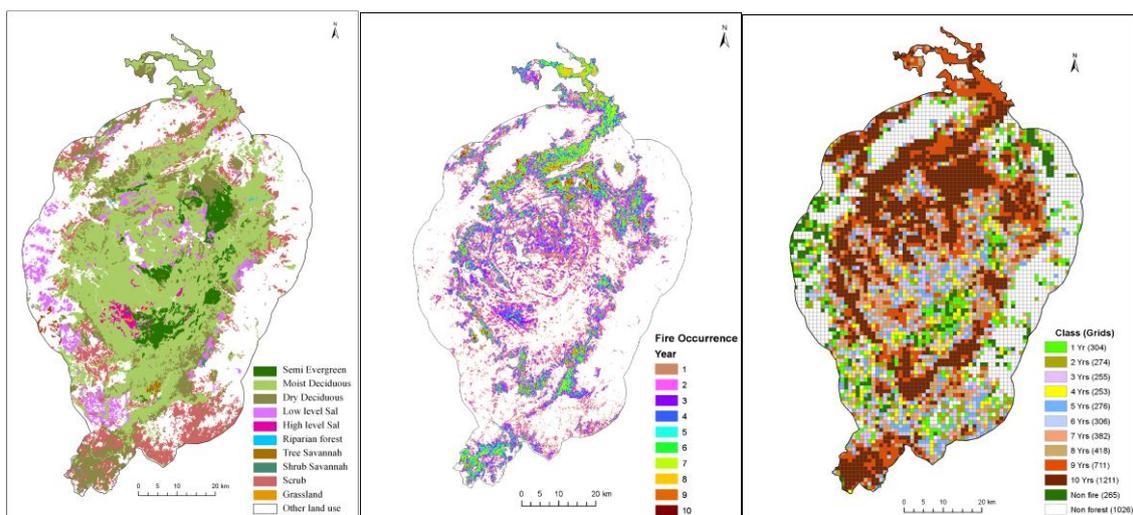


Figura 13. Representación de la zona estudiada. De izq. a dcha.: tipo de vegetación y % cobertura / Recurrencia de incendios por zonas y década / Áreas afectadas por incendios (Saranya *et al.*, 2014).

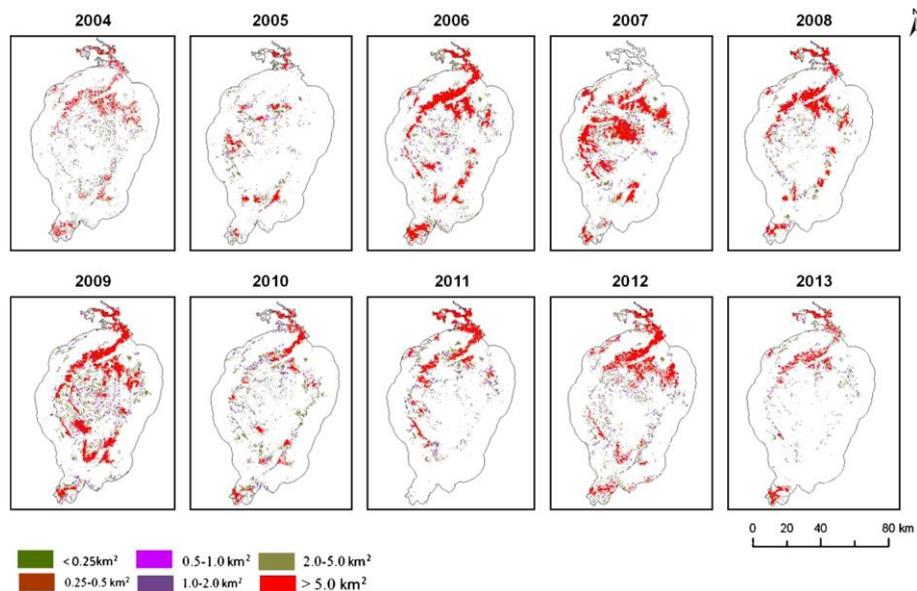


Figura 14. Clasificación y seguimiento de las áreas quemadas por año (Saranya *et al.*, 2014).

Toda esta serie de datos obtenidos con tecnologías infrarrojas de teledetección les permitió elaborar planes específicos en el manejo de incendios y abordar el impacto de los mismos en el ecosistema.

Otra de las tecnologías infrarrojas utilizadas con fines ecológicos, y en este caso de biocontrol de emisiones de metano en vertederos, fue la espectroscopía infrarroja transformada de Fourier (FTIR) y la espectrometría de anillo de cavidad (CRDS, método más avanzado y sensible a las mediciones). Ambos métodos usan un gas indicador (óxido nitroso y acetileno respectivamente) liberado artificialmente. Estos son elegidos porque su comportamiento al liberarlos a la atmósfera es similar al del metano que se quiere analizar; siempre y cuando se den las mismas condiciones ambientales. Suponiendo que ese gas artificial tiene la capacidad de mezclarse con el metano natural del vertedero completamente y conociendo la cantidad de gas indicador que inducimos al medio, podemos conocer la cantidad de metano que se ha emitido para que la mezcla de gases sea homogénea (Mønster *et al.*, 2014).

Como podemos ver en la imagen inferior (Figura 15), las lecturas de los gases se corresponden casi de manera exacta en toda la franja de medición con la tecnología infrarroja de CRDS. La única diferencia que se observa se debe a que en uno de los puntos no se emitió gas indicador (señalado en la imagen como *Old landfill*) para confirmar la regla.

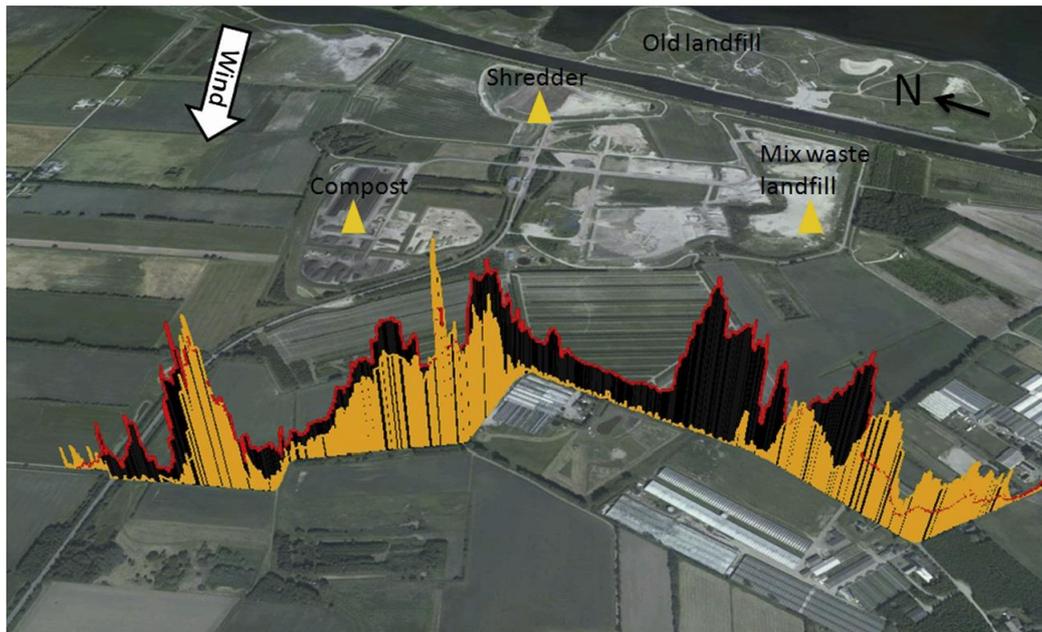


Figura 15. Imagen superpuesta de emisiones de metano (rojo-negro) y gas indicador (amarillo) medidas cerca de un vertedero con procesos de compostaje. Se diferencian tres fuentes de emisión de gas y una cuarta de donde no hubo emisión (Mønster *et al.*, 2014).

En la línea de esta última aplicación, se encuentra la detección de gases combustibles como el propano, para evitar accidentes y vertidos accidentales en las instalaciones de extracción. El grupo de investigación de Kasai desarrolló un método de detección que consiste en un láser óptico oscilador paramétrico (OPO), una cámara infrarroja y una pantalla que refleje todo esto a tiempo real (Kasai *et al.*, 2010).

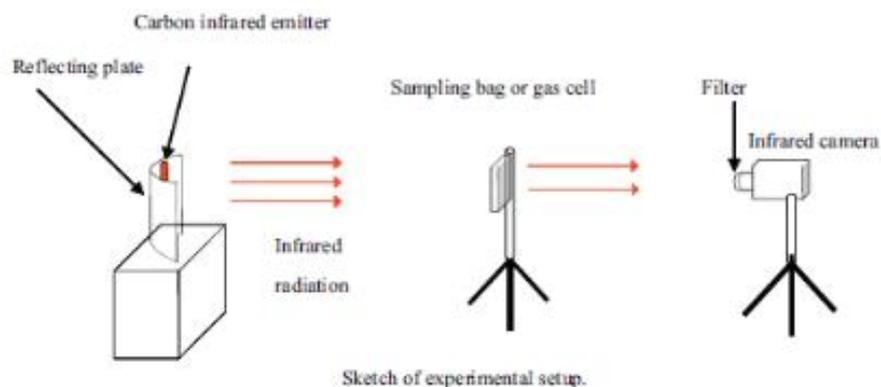


Figura 16. Equipo de medición de propano de Kasai. De izq. a dcha.: emisor de infrarrojos, placa reflectante, celda de gas y cámara infrarroja (Kasai *et al.*, 2010).

Con este sencillo pero costoso equipo se pueden medir en tiempo real las emisiones de propano de una fuga dada en condiciones controladas. Como se puede apreciar en la imagen superior (Figura 16), los infrarrojos rebotarán contra el gas (indicado con las flechas rojas), no dejando pasar la información a la cámara de medición; dando unos valores inferiores de absorbancia

(gráfica inferior derecha) que se corresponderán con la longitud de onda a la que esté calibrado el medidor (en este caso para el propano).

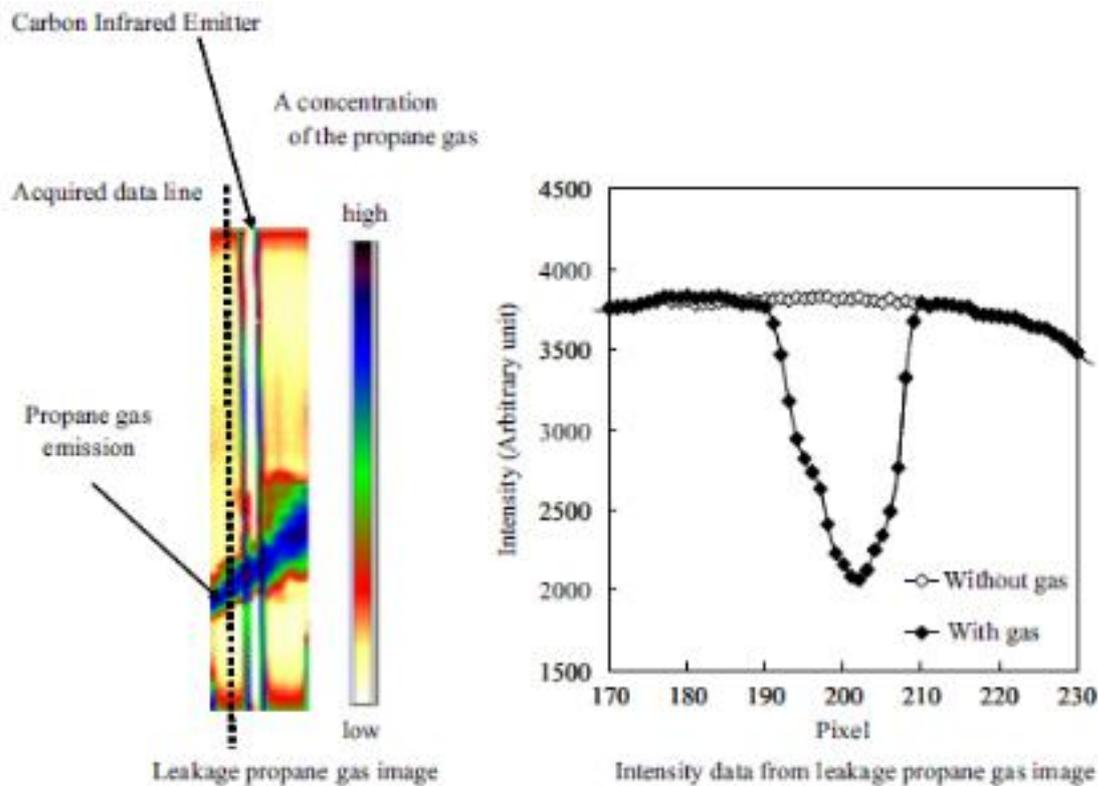


Figura 17. Imagen de la fuga de gas propano con su cambio de intensidad de absorción. El propano está indicado en color azul (Kasai *et al.*, 2010).

Como última aplicación destacable en el campo de la ecología en conjunto con el uso de cámaras termográficas, aparecen los estudios de observación y detección de animales salvajes en sus hábitats y la estimación del tamaño sus poblaciones. Los animales aparecen como “puntos calientes” sobre un fondo oscuro, suficiente para confirmar su presencia. El hecho de que el proceso se pueda llevar a cabo de forma remota, ha dado gran cantidad de posibilidades a los investigadores de vida silvestre (Cilulko *et al.*, 2012).

En algunos casos, los equipos utilizados son cámaras con sensores infrarrojos de calor en movimiento y de destello, capaces de comenzar a grabar cuando captan aumento de la temperatura con respecto al entorno; además de tomar imágenes cuando hay ausencia de luz. En el caso concreto de la Figura 18, el estudio de Tichon (Tichon, 2016) utilizó esta tecnología para estimar, a través de una serie de cámaras trampa puestas de manera

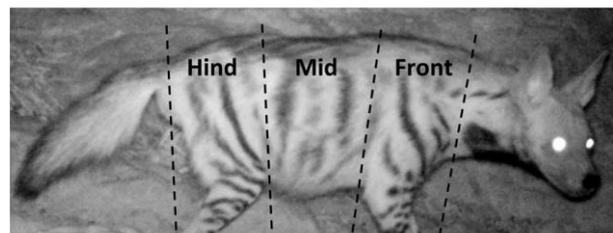


Figura 18. Imagen infrarroja de una hiena en la que se puede apreciar la división del cuerpo en sectores para estimar su edad (Cilulko *et al.*, 2012).

estratégica, la población de hienas (*Hyaena hyaena*) en peligro de extinción en una zona de África. Este método no intrusivo permitió trabajar con un área de 400 km² de manera sencilla y adaptándose a la franja horaria nocturna de estos mamíferos.

El mismo proceso y metodología se utilizan en estudios para comprender el comportamiento de la vida silvestre, las relaciones con el ambiente y la diversidad de especies detectadas en el suereste de la Península Ibérica. Para medir la presencia/ausencia y la abundancia relativa de vertebrados terrestres (principalmente ungulados), se usaron numerosas cámaras trampa con tecnología infrarroja capaz de captar cualquier movimiento incluso en la oscuridad (Belda *et al.*, 2020).

Se han realizado estudios asociados a la biología marina sobre las poblaciones de ballenas jorobadas en los que la tecnología infrarroja ha permitido a biólogos conservacionistas y ecólogos de cetáceos la posibilidad de documentar la distribución espacial y temporal de animales que viven en entornos remotos o inaccesibles (Horton *et al.*, 2017).

Las imágenes térmicas obtenidas con la tecnología FLIR (cámaras de detección infrarroja de alto ángulo cenital), combinadas con un ingenioso sistema de detección de “soplos/respiros” y golpes de ballenas, conforman un eficaz sistema de detección de individuos basado en las anomalías de temperatura que todos estos comportamientos tienen relacionadas.

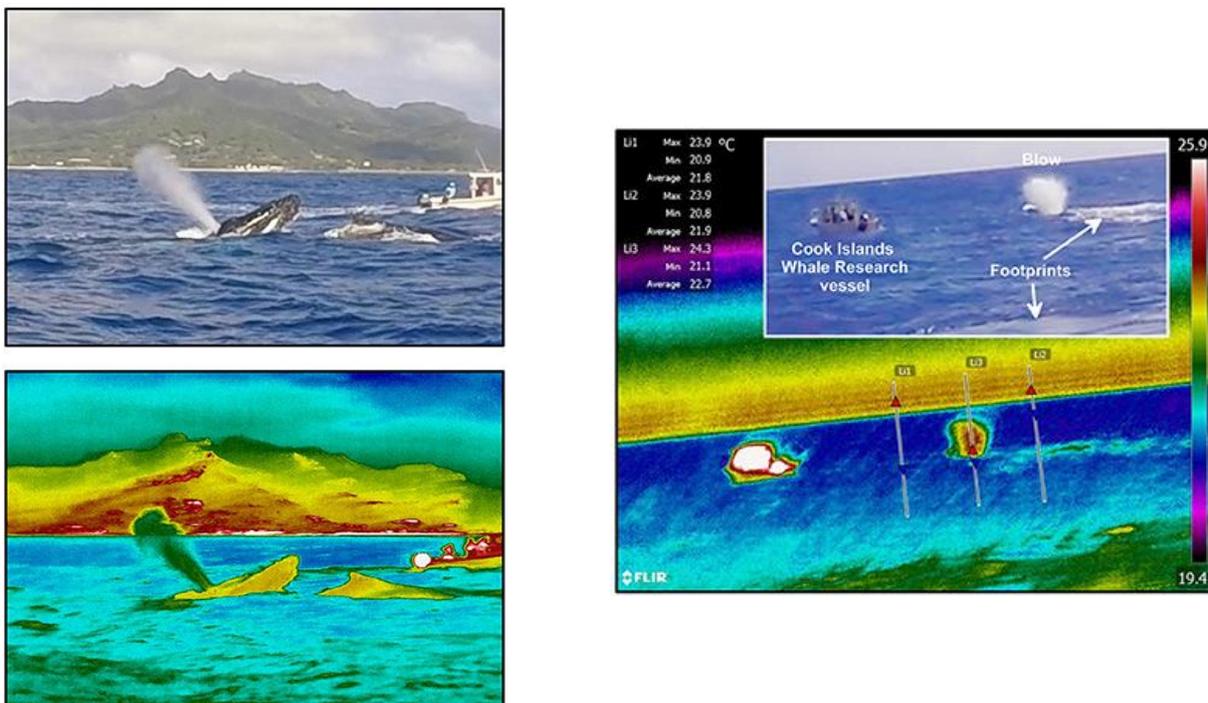


Figura 19. Imagen y termografía infrarroja de un “soplo” de una ballena jorobada (izq.) y análisis con el método FLIR de este fenómeno para poder detectarlo (dcha.) (Horton *et al.*, 2017).

“La investigación termográfica que presentamos crea una plataforma para la entrega de tres contribuciones importantes a la conservación de los cetáceos: (1) identificaciones no invasivas a nivel de especie basadas en las formas y velocidades de las ballenas registradas por tecnología infrarroja; (2) reducción de la tasa de impacto contra buques a través de sistemas de detección termográfica automatizados de cetáceos desplegados en áreas de alto tráfico; (3) monitorear las distribuciones espaciales y temporales de animales en peligro de extinción en hábitats remotos” (Horton *et al.*, 2017, p. 424).

5.2. USOS EN GENÉTICA Y GENÓMICA

La genética y genómica, junto con la nanotecnología, son ciencias que se han aprovechado de la tecnología infrarroja para sus avances científicos. Debido al continuo movimiento al que están sometidas las moléculas, éstas emiten una radiación infrarroja característica que es aprovechada y puede ser medida por los infrarrojos cercanos NIR y lejanos FIR (ya vistos anteriormente). Un ejemplo son las plantas sanas, quienes reflejan una gran proporción de radiación de 800 a 1.400 nm, mientras que las plantas no sanas reflejan longitudes de onda inferiores a 800 nm.

Aprovechando esta tecnología, y de manera mucho más complicada, se pueden llegar a identificar los genes (fenotipado y genotipado) que están teniendo efecto en las distintas características fenotípicas de interés como: resistencia a insectos, sequía, enfermedades y mejora del rendimiento y las cualidades nutricionales.

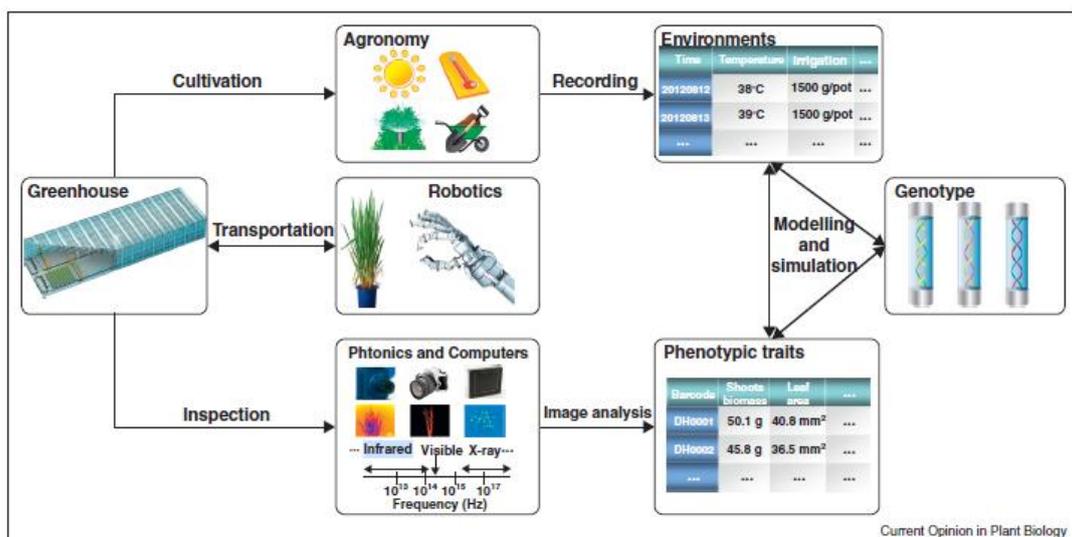


Figura 20. Principales técnicas necesarias para el fenotipado de plantas (Yang *et al.*, 2013).

Como muestra el esquema anterior (Figura 20), el uso de tecnología infrarroja y rayos X, combinadas con la luz visible, es un paso esencial para el proceso de genotipado en plantas. En el caso del arroz, se esperaba que para finales de 2020 se pueda determinar la función de cada gen en el genoma del arroz con el fin de producir variedades de arroz de bajo costo y alto grado de rendimiento (Yang *et al.*, 2013).

Cabe destacar el caso del “arroz dorado”, uno de los primeros proyectos que se aprovecharon del conocimiento del genoma del cereal para que biosintetizara precursores de β -carotenos (precursor de la vitamina A). Su principal objetivo es paliar la falta de dicha vitamina en zonas subdesarrolladas y su creación fue en parte posible gracias a esta tecnología.

5.3. USOS EN AGRICULTURA

La tecnología de imágenes térmicas en la agricultura presenta la posibilidad de predecir el estrés hídrico de los cultivos, planificar los programas de riego, detectar enfermedades y patógenos, predecir el rendimiento de los frutos y su maduración, localizar hematomas y cuerpos extraños y distribuir la temperatura durante la cocción (Vadivambal y Jayas, 2011).

Como se ha mencionado con anterioridad y en otras aplicaciones, la mayor ventaja de la tecnología infrarroja, en este caso térmica principalmente, es que no es invasiva. Sus múltiples aplicaciones incluyen desde evaluar las características y el estado de la propia planta, hasta estimar el estado del agua disponible en el suelo. La Tabla 2 muestra algunos ejemplos de aplicaciones para paliar los problemas más recurrentes:

Tabla 2. Ejemplos de aplicaciones de tecnología térmica en agricultura (Vadivambal y Jayas, 2011).

Cosecha	Problema	Resultados tras estudio con Infrarrojos	Referencias
Algodón, Vid, Frijoles, Altramuces	No hay un método para monitorizar el estrés, la conductancia estomática, la temperatura del dosel	El estrés hídrico y la temperatura del dosel podrían ser identificados con imágenes térmicas para elaborar programas de riego eficientes	(Stoll, 2007) (Jones, 2004) (Sela, 2007)
Tabaco, Vid, Pepino	Dificultad para identificar las plantas enfermas o infectadas	Las zonas infectadas o afectadas por enfermedad pueden ser localizadas incluso antes de que aparezcan lesiones	(Chaerle, 1999) (Oerke, 2006) (Stoll, 2007)
Patata, Coliflor, Cebada	Los métodos para determinar el comportamiento de las plantas ante la congelación no son fiables	La termografía podría explicar dónde comienzan a formarse los núcleos de hielo en la planta	(Fuller, 1998) (Pearce, 2001)
Naranja, Manzana	Costes de la cosecha manual. Elaborar un programa de reconocimiento de frutas para cosechas automáticas es complicado	Ayuda en el desarrollo de la cosecha automatizada; prediciendo el rendimiento de las frutas en el huerto	(Bulanon, 2008) (Stajanko, 2004)

5.4. USOS EN BIOLOGÍA MOLECULAR, BIOQUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA y BIOMEDICINA

La imagen química es una de las tecnologías radiométricas de medición instantánea para espectros e imágenes (información química y espacial). Esta técnica tiene aplicaciones en química, biología, medicina, farmacia, biotecnología, tecnología de los alimentos, etc. Estas denominadas imágenes NIR, IR y Raman (Infrarrojos cercanos, infrarrojos e infrarrojos de cambio de frecuencia) son técnicas de amplio rango espectral capaces de analizar químicamente muestras de todos los tamaños, desde moléculas hasta células (Baianu, 2011).

Otro claro ejemplo es el mapeo no invasivo de eventos moleculares en tejidos *in vivo* usando fluorescencia. La imagen inferior (Figura 21) muestra una fluorescencia típica (a) con una imagen intrínseca (b) del animal que servirá de calibración para conocer la distribución espacial exacta. En la imagen de fluorescencia se puede apreciar un fibrosarcoma HT1080 marcado previamente con catepsina β (sensible a la fluorescencia para que sea visible). Al superponer ambas imágenes (c), obtenemos una mejora en la delimitación espacial del área de interés, facilitando el trabajo y estudio (Ntziachristos *et al.*, 2003).

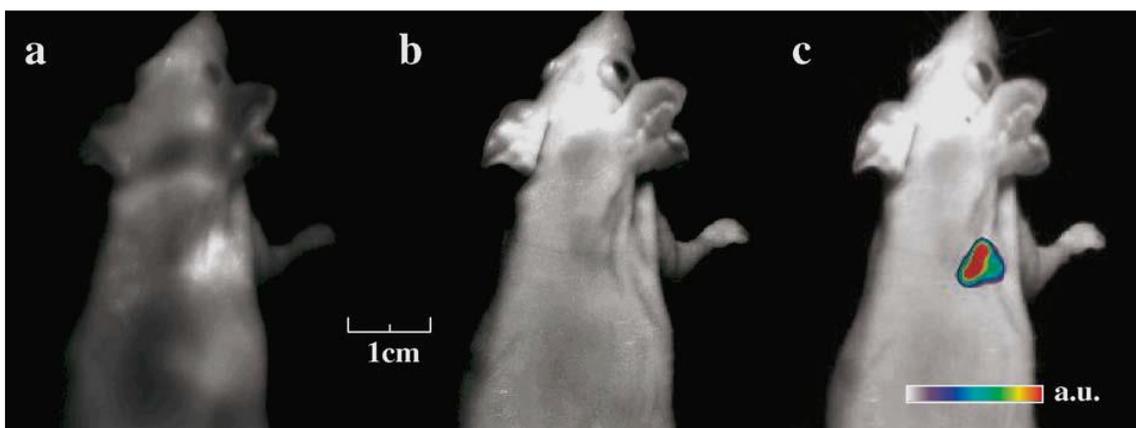


Figura 21. Imagen de fluorescencia (a), intrínseca (b) y superposición de ambas (c) para estudio de sarcomas (Ntziachristos *et al.*, 2003).

Por otro lado, la tecnología de infrarrojos cercanos (NIR) se ha utilizado como parte en procesos industriales de biofabricación de células de mamíferos. La monitorización del proceso se lleva a cabo mediante la inmersión de una sonda con tecnología espectroscópica NIR; capaz de monitorizar procesos fermentativos de hongos, bacterias y células animales. La capacidad intrínseca de tomar muestras químicas y físicas *in situ* y de manera inmediata, es aprovechada para la supervisión de lotes de células, pudiendo detectar, diagnosticar y corregir procesos (Henriques *et al.*, 2009).

Como era de esperar, la biomedicina también se aprovecha de estas tecnologías de medición, debido a la relación intrínseca entre el aumento de temperatura con la presencia de enfermedad. En casos como el de la *diabetes mellitus*, la enfermedad puede llevar consigo una disfunción circulatoria que suele presentarse en extremidades y puede llevar a la ulceración. Con una sencilla prueba de termografía se puede comprobar si el paciente presenta falta de riego sanguíneo en las zonas más comúnmente afectadas por la enfermedad (Ring, 2010).

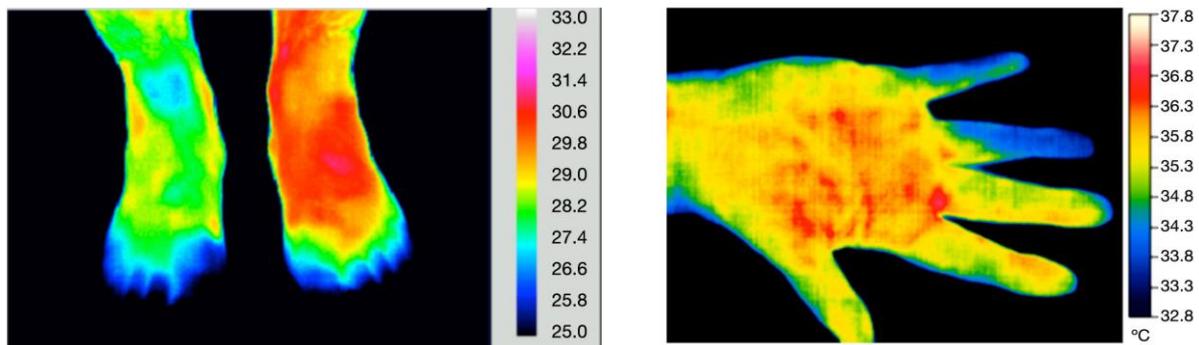


Figura 22. (Izq.) Vista dorsal de los pies, donde se puede apreciar la inflamación del pie izquierdo, con los dedos fríos/ (Dcha.) Vista palmar de la mano donde se puede apreciar la falta de temperatura en los dedos cuarto y quinto (Ring, 2010).

Una vez que se establecieron las bases biológicas esenciales, muchas áreas de la biomedicina abrieron sus puertas a la tecnología termográfica. Existen estudios sobre el cáncer de mama, *varicocele*, enfermedades inflamatorias, anomalías cutáneas etc. (Hodge *et al*, 1996).

La mayoría de ellos están relacionados con el cáncer de mama, ya que muchos investigadores han aceptado la termografía como test complementario a las mamografías como prueba de detección o predicción del riesgo. Muchos otros científicos la han utilizado en otras áreas como la oftalmología, el diagnóstico de melanoma, la esclerosis sistémica o la artritis reumatoide, entre otras (Nola y Kolaric, 2015).

5.5. OTRAS ÁREAS DE APLICACIÓN

En este último apartado se mencionan una serie de áreas menos comunes pero muy interesantes que también han hecho uso de la radiometría para su estudio. Un ejemplo es la biofísica, que ha desarrollado multitud de aplicaciones clínicas mediante el uso de la fotodinámica o PDT (medicamentos fotosintetizadores activados por luz). Existen tratamientos contra cáncer, infecciones localizadas, degeneración macular, dermatología (particularmente efectiva para melanomas y tumores cutáneos)... (Wilson y Patterson, 2008).

Otra de sus aplicaciones curiosas es la lucha contra las actividades ambientales ilegales:

“Nuestro equipo de investigación ha introducido el uso de una gama de plataformas aéreas y junto con tecnología termográfica para detectar varias actividades ilegales como, por ejemplo: alcantarillado sanitario ilegal y conexiones de drenaje pluvial, descargas ilícitas de aguas residuales y otras "anomalías" en aguas superficiales; fácilmente detectables usando sus firmas infrarrojas termales. También se puede usar para detectar vertederos ilegales de desechos sólidos / líquidos o descargas de ilícitas de gases” (Lega *et al.*, 2014, p. 8291).

Numerosas aplicaciones se han llevado a cabo también en el campo de la microbiología, como es el caso de la caracterización de compuestos y estructuras celulares gracias a su análisis de bandas con tecnología infrarroja, así como la identificación, diferenciación y clasificación de microorganismos y colonias por espectroscopía (unas 3000 bacterias se han descrito con estos métodos) y las pruebas de sensibilidad a antibióticos y otros compuestos de interés (Naumann, 2006).

Finalmente, cabe mencionar que existe una novedosa aplicación de esta tecnología para la lucha contra la actual pandemia del COVID-19. *Kanazawa* y su equipo han validado el posible uso de los smartphones con accesorios de tecnología infrarroja (FLIR) para una posible detección de la fiebre, uno de los principales síntomas de los coronavirus, incluyendo el COVID-19, por lo que quizás podría ser de utilidad en la actualidad (*Kanawaza et al.*, 2016).



Figura 23. El dispositivo FLIR ONE conectado a un teléfono inteligente (izq.) y un termógrafo rutinario (dcha.) (*Kanawaza et al.*, 2016).

6. CONCLUSIONES

La radiometría es una ciencia que se encarga de la medición de la radiación de todas las longitudes de onda del espectro electromagnético.

Desde la optometría a la termografía, los rayos X y gamma, la radiación infrarroja o las ondas de radio y televisión. La radiometría es la encargada de cuantificar y entender todos estos fenómenos físicos y desarrollar aplicaciones a partir de ellos. La Biología en general se ha nutrido mucho de estas técnicas, siendo útil en actividades tan diversas como el conteo de individuos para estudios de poblaciones en ecología, la localización de heridas y enfermedades de plantas en fisiología vegetal o la identificación y diferenciación de microorganismos en microbiología.

Por otro lado, el estudio bibliométrico nos ha permitido analizar la evolución de la radiometría en la literatura científica y analizar su importancia. Se observan tendencias claras en el uso de esta técnica desde el año 1990 hasta la actualidad, especialmente a partir del año 2000. Todos los motores de búsqueda empleados, con mayor o menor nivel de aumento, mostraron valores positivos en importancia con respecto al uso de la radiometría como herramienta científica en general.

Finalmente, dando a conocer con ejemplos el aporte de la radiometría al mundo de la Biología, se ha querido dar visibilidad a todas esas aplicaciones y técnicas desconocidas en la mayoría de ocasiones. Destaca su uso en ecología, en casos como la detección de animales y el seguimiento de su población, el control de incendios forestales o fugas de gas y el control de la contaminación térmica del agua. Por otro lado, existen aplicaciones menos comunes en áreas como la genética y genómica (uso de rayos X para el genotipado); la biotecnología y biomedicina (infrarrojos cercanos e imágenes termográficas para la detección de anomalías); la agricultura (predicción del rendimiento de frutales) o la biofísica (desarrollo de aplicaciones clínicas contra enfermedades como el cáncer), entre otras.

Nuestro trabajo es fruto del estudio sobre la actividad e influencia de esta ciencia, su evolución y su actual y, seguro, futura importancia en las distintas ramas de la Biología.

Referencias

- Ali, J. Abuhabaya, A. y Fieldhouse, J. (2011) "Infrared thermography study of thermal plume", *The 17th International Conference on Automation and Computing, Huddersfield*, pp. 234-239.
- Baianu, I. (2011) "Applications of microspectroscopy, hyperspectral chemical imaging and fluorescence microscopy in chemistry, biochemistry, biotechnology, molecular and cell biology", *Nature Precedings*, DOI:org/10.1038/npre.2011.6593.1
- Belda, A., Oltra-Crespo, S., Miró-Martínez, P. y Zaragoza, B. (2020) "Can spatial distribution of ungulates be predicted by modeling camera trap data related to landscape indices? A case study in a fragmented mediterranean landscape", *Caldasia*, 42(1), pp. 96-104.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M. y Oliva, P. (2020) "Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management", *Current Forestry Reports*, 6, pp. 81-96.
- Cilulko, J., Janiszewski, P., Bogdaszewski, M. y Szczygielska, E. (2012) "Infrared thermal imaging in studies of wild animals", *European Journal of Wildlife Research* 59, pp. 17-23.
- Fluke (sin fecha) *Fluke*. [How infrared cameras work]. Disponible en: <https://www.fluke.com/en-us/learn/best-practices/measurement-basics/thermography/how-infrared-cameras-work> (Accedido: 12 de mayo de 2020).
- Franko, S., Babusova, E. y Badida, M. (2011) "Thermography and possibilities of its application in practice", *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 22(1), pp. 1233-1234.
- Fritzsche, H. (2016) *Encyclopædia Britannica* [Wien's law]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/Wiens-law> (Accedido: 10 de mayo de 2020).
- Gómez González, E. (2006) *Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría*. Guía básica de conceptos. Universidad de Sevilla.
- Henriques J.G., Buziol S., Stocker E., Voogd A. y Menezes J.C. (2009) "Monitoring mammalian cell cultivations for monoclonal antibody production using near-infrared spectroscopy", *Optical Sensor Systems in Biotechnology. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 116, pp. 73-97.
- Hodge, M. (Sin fecha) Michelle Hodge, DC. Chiropractic and Thermography. Disponible en: <https://reddingthermography.com/body-thermography/> (Accedido: 20 de Mayo de 2020).
- Horton, T. W., Oline, A., Hauser, N., Khan, T.M., Laute, A., Stoller, A., Tison, K. y Zawar-Reza, P. (2017) "Thermal imaging and biometrical thermography of humpback whales", *Frontiers in Marine Science*, 4:424. DOI: 10.3389/fmars.2017.00424
- Kaleem, Z. y Rehmani, M. H. (2018) "Amateur drone monitoring: state-of-the-art architectures, key enabling technologies, and future research directions", *IEEE Wireless Communications*, pp. 150-159.
- Kanazawa, T., Nakagami, G., Goto, T., Noguchi, H., Oe, M., Miyagaki, T., Hayashi, A., Sasaki, S. y Sanada, H. (2016) "Use of smartphone attached mobile thermography assessing subclinical inflammation: a pilot study", *Journal of Wound Care*, 25(4) pp. 177-182.
- Kasai, N., Tsuchiya, C., Fukuda, T., Sekine, K., Sano, T. y Takehana, T. (2011) "Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera", *NDT&E International*, 44, pp. 57-60.
- Lega, M., Ferrara, C., Persechino, G. y Bishop, P. (2014) "Remote sensing in environmental police investigations: aerial platforms and an innovative application of thermography to detect several illegal activities", *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, pp. 8291-8301.
- Melgosa Revillas, S. (2011) *Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. 1.ª ed. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A.
- Mønster, J., Samuelsson, J., Kjeldsen, P. y Scheutz, C. (2014) "Quantification of methane emissions from 15 Danish landfills using the mobile tracer dispersion method", *Waste Management*, 35, pp. 177-186.
- Naumann, D. (2006) "Infrared spectroscopy in microbiology", *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. DOI: 10.1002/9780470027318.a0117.

- Nola, I.A y Kolaric, D. (2015) “Thermography in biomedicine”, *57th International Symposium ELMAR*, pp. 17-20. DOI: 10.1109/ELMAR.2015. 7334485.
- Ntziachristos, V., Bremer, C. y Weissleder, R. (2003) “Fluorescence imaging with near-infrared light: new technological advances that enable in vivo molecular imaging”, *European Radiology*, 13, pp.195–208.
- Olmo, M. y Nave, R. (sin fecha) *Hyperphysics*. [Ley de Stefan-Boltzmann]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html> (Accedido: 20 de mayo de 2020).
- Ring, F. (2010) “Thermal imaging today and its relevance to diabetes”, *Journal of Diabetes Science and Technology*, 4(4), pp. 857-862.
- Saranya, K.R.L., Reddy, C.S., Rao, P.V.V.P. y Jha, C.S. (2014) “Decadal time-scale monitoring of forest fires in Similipal Biosphere Reserve, India using remote sensing and GIS”, *Environ Monit Assess*, 186, pp. 3283–3296.
- Stillman, G.E. (2002) “Optoelectronics”, en Middleton, W. M. y Van Valkenburg, M. E. (9) *Reference data for engineers (ninth edition)*, *Radio, electronics, computer and communications*. 9ª ed. Newnes: Newnes 21.1 pp.21-31
- Vadivambal, R. y Jayas, D.S. (2010) “Applications of thermal imaging in agriculture and food industry—a review”, *Food Bioprocess Technology*, 4, pp. 186-199.
- Wellons, M. (2007) *The Stefan-Boltzmann Law*. Experimento. Universidad de Ohio.
- Williams, T. L. (2009) “Thermal imaging cameras: characteristics and performance”; en Taylor & Francis Group (ed.) *Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance*. 1.ª ed. New York: CRC Press, pp. 7-8.
- Wilson, B.C. y Patterson, M.S. (2008) “The physics, biophysics and technology of photodynamic therapy”, *Physics in Medicine and Biology*, 53, pp. 61-109.
- Yang, W., Duan, L., Chen, G., Xiong, L. y Liu, Q. (2013) “ Plant phenomics and high-throughput phenotyping: accelerating rice functional genomics using multidisciplinary technologies”, *Current Opinion in Plant Biology*, 16(2), pp. 180-187.
- Zamora, R. (Sin fecha) RafaelZamora [*Estudio de la radiación del cuerpo negro. Determinación de la constante de Wien.*]. Disponible en: <http://rafaelzamora.es/> (Accedido: 13 de mayo de 2020)