

# Potencialidades de los celulares inteligentes para investigaciones biológicas. Parte 3: Cámaras digitales

## Potentials of smartphones for biological researches. Part 3: Digital cameras

Yarelys Ferrer-Sánchez<sup>1,\*</sup>, Fermín L. Felipe<sup>2</sup>, Daryl D. Cruz Flores<sup>3</sup> y Dennis Denis<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. C.P. 120301. <sup>2</sup>Jardín Botánico Nacional, Universidad de La Habana, Carretera El Rocío, km 3½, Calabazar, Boyeros, La Habana, Cuba. C.P. 19230. <sup>3</sup>Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. C.P. 62209. <sup>4</sup>Departamento de Biología Animal y Humana, Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Calle 25, N° 455, e/ I y J, Vedado, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba. C.P. 10400. \*Autor para correspondencia: (e-mail: [yferrer@uteq.edu.ec](mailto:yferrer@uteq.edu.ec)),

### RESUMEN

Los modelos modernos de teléfonos inteligentes contienen potentes cámaras digitales con sensores que rivalizan con equipos profesionales pero que, al unirse a sus capacidades de procesamiento y comunicación, amplían el rango de aplicaciones potenciales en el campo de la investigación. En este trabajo se hace una revisión de las potencialidades que brindan estas cámaras y sus aplicaciones a investigaciones biológicas y biomédicas. Entre estas se encuentra que la capacidad de leer y registrar códigos de barras y de respuesta rápida puede ser aprovechada como método de marcaje. Diferentes aplicaciones pueden desarrollar análisis morfométricos avanzados a partir de las imágenes captadas, tanto para la toma de mediciones, análisis de patrones e identificación automatizada de especies o individuos. Se ha desarrollado la microscopía portable a través de dispositivos adjuntos relativamente simples. El sensor de estas provee datos de 8 o 16 bits en los canales de color primario de la luz que permiten su uso en colorimetría, fotometría y espectrometría para aplicaciones bioanalíticas en la detección y evaluación de la concentración de sustancias químicas. Además, en el monitoreo de la calidad del aire, turbidez del agua y para caracterizar el color del suelo. También se han usado en el monitoreo de la radiación ultravioleta. La activación automática por movimiento y la toma de videos permiten su uso en estudios conductuales. Toda esta gama de aplicaciones y potencialidades hacen que el teléfono inteligente se pueda convertir en un importante y versátil instrumento de investigación.

**Palabras clave:** análisis de imágenes, mediciones digitales, sensores CMOS, Sistemas de Identificación Automatizada

### ABSTRACT

Modern smartphones possess powerful digital cameras that are rivaled with semiprofessional equipment. When coupled to phone processing and communicating services it widens the range of potential uses in researches. In this paper, we review the potentialities of these cameras and apps from worldwide published experiences analysis. The ability to read and register barcodes or Quick Response codes can be used as a marking or tagging method. Different apps can perform advanced morphometric analysis from captured images, for physical measuring, pattern analysis, or automated species or individual recognition. Using relatively simple external devices the field of portable microscopy has been developed. The sensor provides 8 or 16 bits in primary color channels that made possible their use in colorimetric, photometry, and spectrometry for bio analytic applications detecting and assessing the concentration of chemical substances, monitoring air quality, water turbidity of soil color. They have been used also for ultraviolet radiation monitoring. Motion activation and a video recording made possible their use in behavioral studies. All this range of applications and potentialities can turn smartphones into an important and versatile research instrument.

**Keywords:** image analysis, digital measurement, CMOS sensor, Automated Identification Systems

**Citación:** Ferrer-Sánchez, Y., Felipe, F.L., Cruz, D.D. & Denis, D. 2022. Potencialidades de los celulares inteligentes para investigaciones biológicas. Parte 3: Cámaras digitales. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 43: 15-31.

**Recibido:** 01 de octubre de 2021. **Aceptado:** 25 de enero de 2022. **Publicado en línea:** 20 de abril de 2022. **Editor encargado:** Luis Manuel Leyva.

### INTRODUCCIÓN

Los teléfonos inteligentes se han considerado el pináculo de la tecnología de consumo en la era moderna de la información y las comunicaciones (Wicks & al. 2018). En estos equipos se combinan servicios de una computadora portable, una cámara digital potente, una pantalla de alta resolución, una amplia gama de sensores remotos, interfaces audiovisuales y conectividad a internet y entre equipos. Todo en un paquete tecnológico que evoluciona de forma constante, conjuntamente con un universo de aplicaciones asociadas (Lane & al. 2010; Teacher & al. 2013; Wicks & al. 2018). A pesar de existir desde hace solo poco más de una década, han alcanzado una penetración sin precedentes en la sociedad, donde forman parte de la vida diaria de más de 3,5 billones de personas (Statista 2020).

La posibilidad de uso de instrumentos ópticos para ver y registrar información ha sido de gran ayuda para el biólogo y ha tenido una gran influencia en la comprensión de la naturaleza. Desde los primeros microscopios hasta los binoculares, las innovaciones en los equipos ópticos han impactado fuertemente el campo de la ecología (McKeon & al. 2020). El primer teléfono con cámara fotográfica apareció en 1997, aunque no se generalizaron hasta pasado el año 2000, cuando Samsung fabricó su primer teléfono móvil con cámara (capaz de tomar 20 fotos con una resolución de 0,35 megapíxeles) (*The Telegraph* 2018). A partir de ese momento se comienza una carrera para el desarrollo de cámaras de mayor potencia y eficiencia, hasta los modelos actuales con cinco cámaras integradas sincronizadas de

hasta 16 lentes que trabajan juntas para producir fotografías extremadamente detalladas.

Particularmente, las cámaras fotográficas de los celulares en la última década se han desarrollado según la Ley de Moore y se han duplicado cada dos años los megapíxeles, así como la potencia de cálculo disponible por dólar, que también ha aumentado en un factor de 10 cada cuatro años (AI Timelines 2017). La calidad de los lentes, el tamaño de los sensores y la estabilización de la imagen han adicionado valor a las imágenes, sobre todo cuando se unen a la “inteligencia” del teléfono, que permite el desarrollo de programas que las analizan en tiempo real. Por ello, las aplicaciones de los celulares a tareas científicas han alcanzado el nivel de uso de la fotografía digital convencional con cámaras profesionales o semi-profesionales, y se han aplicado a un amplio campo de disciplinas, tanto en condiciones de laboratorio como de campo (Kwon & Park 2017). Las cámaras de celulares, que operan bajo el principio de que “la mejor cámara es la que tienes encima contigo”, han aumentado el volumen de imágenes y observaciones naturales disponibles para el trabajo científico. De esta forma contribuyen significativamente al desarrollo de *Big Data* en campos disímiles como las ciencias sociales, climatología, geografía, ecología y otros estudios de biodiversidad.

En muchos trabajos científicos los investigadores dependen de sus sentidos para la detección, diagnóstico y descripciones, pero la precisión de este método es individual y varía de persona a persona; además de depender de la experiencia previa, estrés, edad, estado anímico o de salud, contexto, etc. El uso de métodos electrónicos estandarizados, como las fotografías digitales procesadas por programas computarizados especializados, ha sustituido gradualmente las descripciones cualitativas visuales. Para estas tareas el uso secuencial de cámaras fotográficas tradicionales y computadoras se ha visto suplantado por las aplicaciones de celulares que pueden hacerlo todo de una vez (Pongnumkul & al. 2015, Liu & al. 2019). Por ello, los teléfonos fortalecidos con nuevos sensores, con las potencias del cálculo en la nube y metodologías avanzadas como la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina, se han convertido en eficientes vías para enfrentar complejos problemas investigativos.

Diferentes aplicaciones de celulares pueden desarrollar análisis morfométricos avanzados a partir de las imágenes digitales (Kumar & al. 2016), que pueden ser utilizados bien para la toma de mediciones (Brandoli & al. 2016), para el análisis de patrones o para la identificación automatizada de especies o individuos (Bolger & al. 2012, Hiby & al. 2013) a través de métodos de visión computarizada. Hatiboruah & al. (2020) utilizaron las cámaras de celulares para desarrollar análisis turbidimétricos de la cinética de crecimiento de cultivos bacterianos. Por otro lado, Wess (2017) las utilizó como colorímetros para medir el grado de conservación del papel en documentos antiguos almacenados, en los que el amarillamiento y endurecimiento los torna frágiles y amenazan su conservación.

El uso de las cámaras de los celulares se ha extendido a fotos más especializadas con aditamentos acoplados, incluso hasta la microscopía portable, colorimetría, fotogrametría y espectrometría. Estas aplicaciones han tenido un fuerte impacto en el desarrollo de la Internet de las Cosas (*Internet of Things*), de la salud pública (*mHealth*) y de las propias investigaciones biológicas (Geng & al. 2017). Kwon & Park (2017), en una revisión de las aplicaciones de teléfonos celulares en agricultura, estudios ambientales y de los alimentos, señalan que la cámara es posiblemente el sensor electrónico de mayor aplicación en estos estudios. En la agricultura de precisión, las aplicaciones de celulares inteligentes se han vuelto una herramienta importante y de crecimiento exponencial desde hace más de una década (Mendes & al. 2020), y muchas de ellas se apoyan en el uso de las cámaras.

Dada la alta velocidad de las innovaciones en este campo, el plazo entre el surgimiento e implementación de nuevos métodos es cada vez menor, pero no siempre se tiene todo el conocimiento sobre las potencialidades existentes. Por estas razones, en el presente trabajo se hace una revisión de las posibilidades que brindan las cámaras digitales de los celulares inteligentes modernos y sus aplicaciones para las investigaciones biológicas y biomédicas.

#### **Descripción general de las cámaras fotográficas de los teléfonos inteligentes**

Las cámaras fotográficas de los celulares se basan en un sensor de píxeles activos (APS) que detecta la luz mediante la tecnología CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*), fundamentada en el efecto fotoeléctrico. Este posee múltiples ventajas, entre ellas un bajo consumo de energía en comparación con otros sistemas como el CCD (*charged-coupled device*). Entre otras ventajas está el hecho de ser más económicos, además, pueden leer un mayor número de píxeles de forma simultánea, el conversor digital se integra en el mismo chip y no hay *blooming* (influencia del brillo en un punto del sensor sobre los adyacentes). Además, permiten la exposición y lectura de los píxeles de forma simultánea, una previsualización más rápida y muy alta frecuencia de imagen. Este sensor es básicamente una placa de fotoceldas con una alta densidad de integración, una para cada píxel, que producen una corriente eléctrica que varía en función de la intensidad de la luz recibida y luego se amplifica. Para detectar los colores contiene un sistema de filtros que recoge cada tipo de luz (roja, verde y azul) (filtro Bayer). Así, el sensor provee datos de 8 bits en los canales RGB (*Red, Green and Blue*) que permiten el uso en colorimetría, fotometría y espectrometría (Theuwissen 2008).

El modo profesional de muchos teléfonos permite ajustar la velocidad de obturación y la escala de sensibilidad fotográfica ISO (*International Standard Office*), así se tiene más control sobre la cámara, y además, aumenta el acceso a las imágenes *raw*, sin procesamiento interno y de máxima calidad, a partir del formato *.dng* (*digital negative format*). También existen adaptadores con lentes acoplables que extienden las potencialidades de los teléfonos para la toma de fotos a gran

distancia, o adaptadores para acoplar el celular a telescopios, binoculares y otros equipos ópticos dedicados.

### Usos de las cámaras para mediciones y conteos

Los usos más simples de las cámaras de los teléfonos celulares se asocian a mediciones digitales que se pueden hacer sobre las imágenes, ya sea como índices relativos o distancias físicas una vez calibradas (Daponte & al. 2013). En una fotografía digital, el tamaño del pixel en milímetros ( $p$ ) se puede estimar a partir de la distancia focal de la cámara ( $f$ , en mm), el número total de píxeles horizontales ( $W_m$ ) (o verticales) y el ángulo del campo de visión ( $\Theta$ , en grados) por la ecuación:  $p = (2f/W_m) \tan \Theta/2$ . Si en la fotografía aparece un objeto estándar de tamaño conocido ( $D$ ), este es equivalente al producto del número de píxeles y el tamaño de píxel, y por tanto, la distancia entre el plano del objeto y la cámara ( $u$ ) se puede calcular como:  $u = fD/\Theta p$ .

Con estas relaciones es posible programar algoritmos de medición automática que se ejecuten en aplicaciones del teléfono y tomen como entrada las imágenes de la cámara integrada (Wang & al. 2018). Sin embargo, los procedimientos de análisis digital de imágenes también permiten el filtrado y extracción de muchos tipos de información relativa (Figura 1) sin necesidad de medidas de distancias físicas.

Las aplicaciones de las cámaras de los celulares pueden leer y registrar códigos de barras y QR (del inglés, *Quick Response*), por lo cual pueden ser aprovechadas para métodos de marcaje. En un extenso experimento de laboratorio de cultivo de tejidos o colonias bacterianas es más eficiente, en términos de esfuerzo, rapidez y precisión, marcar cada placa de cultivo o recipiente con un código de barras. Lo anterior permite registrar el desarrollo del experimento mediante el uso de la cámara del celular, que puede leer el código, registrar fecha, hora y tomar fotografías de las muestras simultáneamente. Este uso específico en ensayos de fenotipos celulares en laboratorios fue demostrado por Carpenter & al. (2006). Por otra parte, Guan & al. (2014) diseñaron un papel sensor de tipo de sangre en forma de código de barras que podía ser leído rápidamente por un celular. Además, las cámaras también pueden emplearse para leer marcas en animales grandes en estudios de captura marcaje y recaptura.

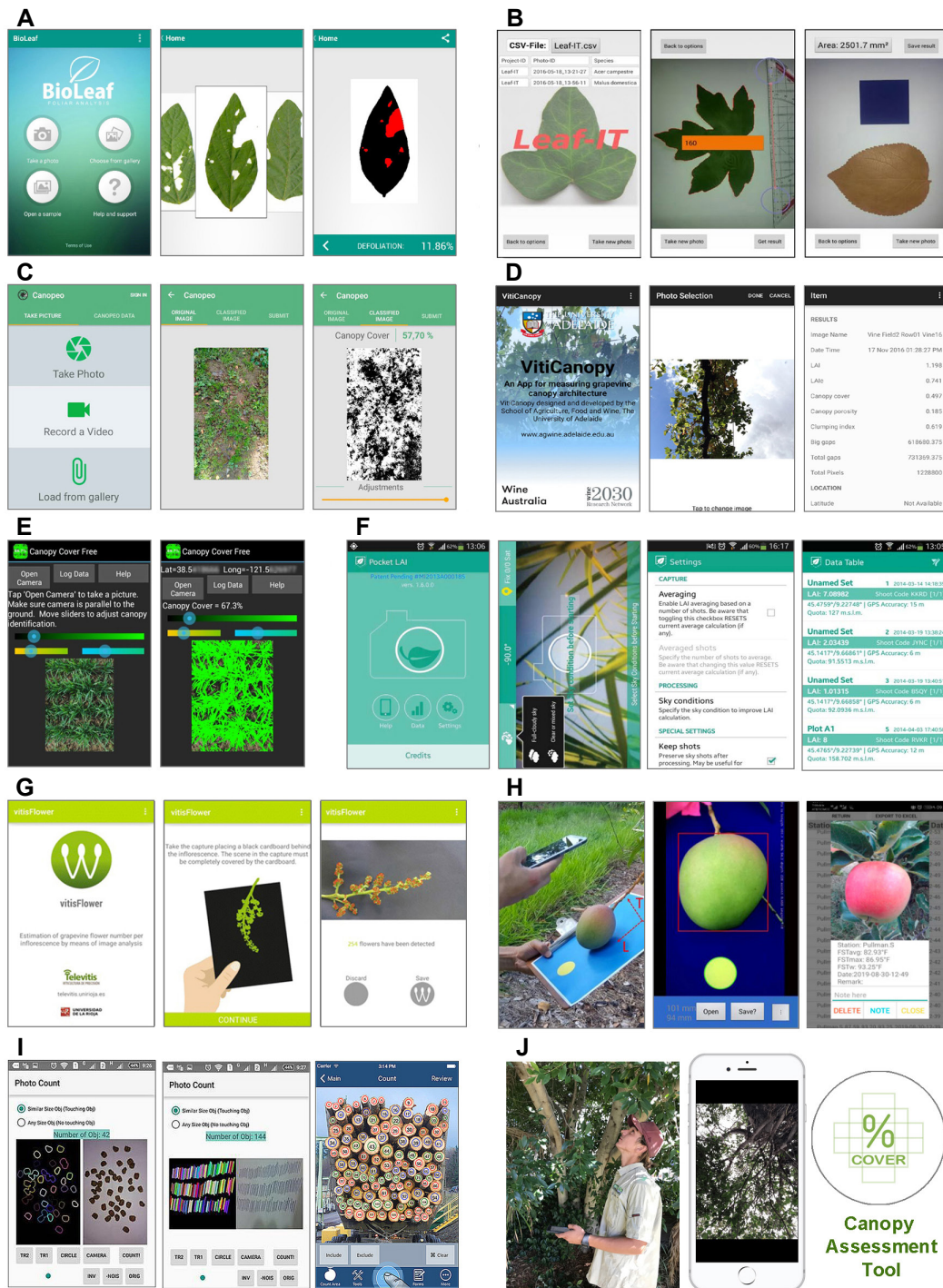
Con algoritmos de filtrado de las imágenes se pueden programar aplicaciones de conteo de objetos (Figura 1). Suo & al. (2017) diseñaron una aplicación para contar en tiempo real los áfidos capturados en tablillas adhesivas, mediante el empleo de celulares, para monitoreo de plagas con precisiones de 92-95 %. También existen otras aplicaciones para contar células o animales en el campo (Iliffe & al. 2011).

En el campo de la ecología vegetal se han desarrollado aplicaciones especializadas a partir de fotografías digitales para evaluar diferentes indicadores dendrológicos de la canopia. La fotografía hemisférica fue de hecho la primera técnica fotográfica utilizada en ciencias forestales (Evans & Coombe

1959) para analizar la penetración de la luz a través de la vegetación y otros atributos (Bonhomme & al. 1972) antes de la fotografía digital. Actualmente, con pequeñas lentes ojo-de-pep (*fish-eye lens*) se pueden tomar fotos hemisféricas cenitales (360°) de todo el cielo para determinar automáticamente el porcentaje de cobertura nubosa (Parisi & al. 2016), la intensidad de luz en sotobosques, la cobertura vegetal o el índice de área foliar (*LAI*) (Jonckheere & al. 2004). Para ello se han desarrollado varias aplicaciones como *VitiCanopy* (De Bei & al. 2016), *Canopy Cover Free* (Easlon 2016) y *Canopeo* (Patrignani & Ochsner 2015). Se ha medido también el índice de área foliar, por ejemplo, con las aplicaciones *Easy Leaf Area* (Easlon & Bloom 2014), *PocketLAI* (Confalonieri & al. 2014) o *Smart fLAIr (fast LAI retrieval)* (Bauer & al. 2016).

Miller & al. (2015) usaron fotografías desde teléfonos para modelar tridimensionalmente y calcular métricas de propiedades de árboles (altura, diámetro del tronco, volumen de la corona, etc.). Las aplicaciones *vitisFlower* (Aquino & al. 2015) y *vitisBerry* (Aquino & al. 2018) permiten contar automáticamente el número de flores de una inflorescencia de uvas o el número de uvas de un racimo, a partir de fotografías. La aplicación *FruitSize* (Wang & al. 2018) permite la toma de medidas de frutos a partir de fotografías tomadas del celular.

Otro buen ejemplo del uso de fotografías de celulares para apoyo de investigaciones a largo plazo aparece en los estudios fenológicos. En este campo, las fotografías repetidas son uno de los métodos más utilizados, con un incremento exponencial en interés y número de publicaciones en las últimas décadas (Richardson & al. 2009). Las redes de cámaras digitales de adquisición continua cronometrada se han implementado en muchos proyectos, como *PhenoCam* (<http://phenocam.sr.unh.edu/webcam/>), el *European Phenology Network* (EPN) y *Phenological Eyes Network* (PEN) (<http://www.pheno-eye.org>) (Nasahara & Nagai 2015). De estas imágenes procesadas digitalmente pueden extraerse índices relativos que permiten describir cambios temporales en la vegetación y evaluar la dinámica de propiedades de los ecosistemas. Otros estudios a largo plazo con estas cámaras son llevados por *AmeriFlux* (<http://ameriflux.lbl.gov/>), *NEoN* (*National Ecological observatory Network* de US; (<http://www.neoninc.org/>), *EuRoFLuX*, *AsiaFlux* (<http://asiaflux.net/>), el *Japan Long Term Ecological Research Network* (*JaLTER*, <http://www.jalter.org/>), *Chinese Ecological Research Network* (CERN, <http://www.cern.ac.cn>), *Long-Term Ecological Research Network* de EU (LTER, <http://www.lternet.edu>), y el *International Long-Term Ecological Research Network* (ILTER, <http://www.ilternet.edu>), cuyos datos masivos están accesibles en línea (Tang & al. 2016). La mayoría de estos proyectos emplea sencillas cámaras digitales de bajo costo (*webcams*), pero el *Picture Post*, de la *NASA's Digital Earth Watch*, ha implementado una red de sitios fijos para que cualquier persona con un teléfono celular o cámara digital pueda contribuir a estos estudios fenológicos, así como a estudios de cambio climático (Figura 2).



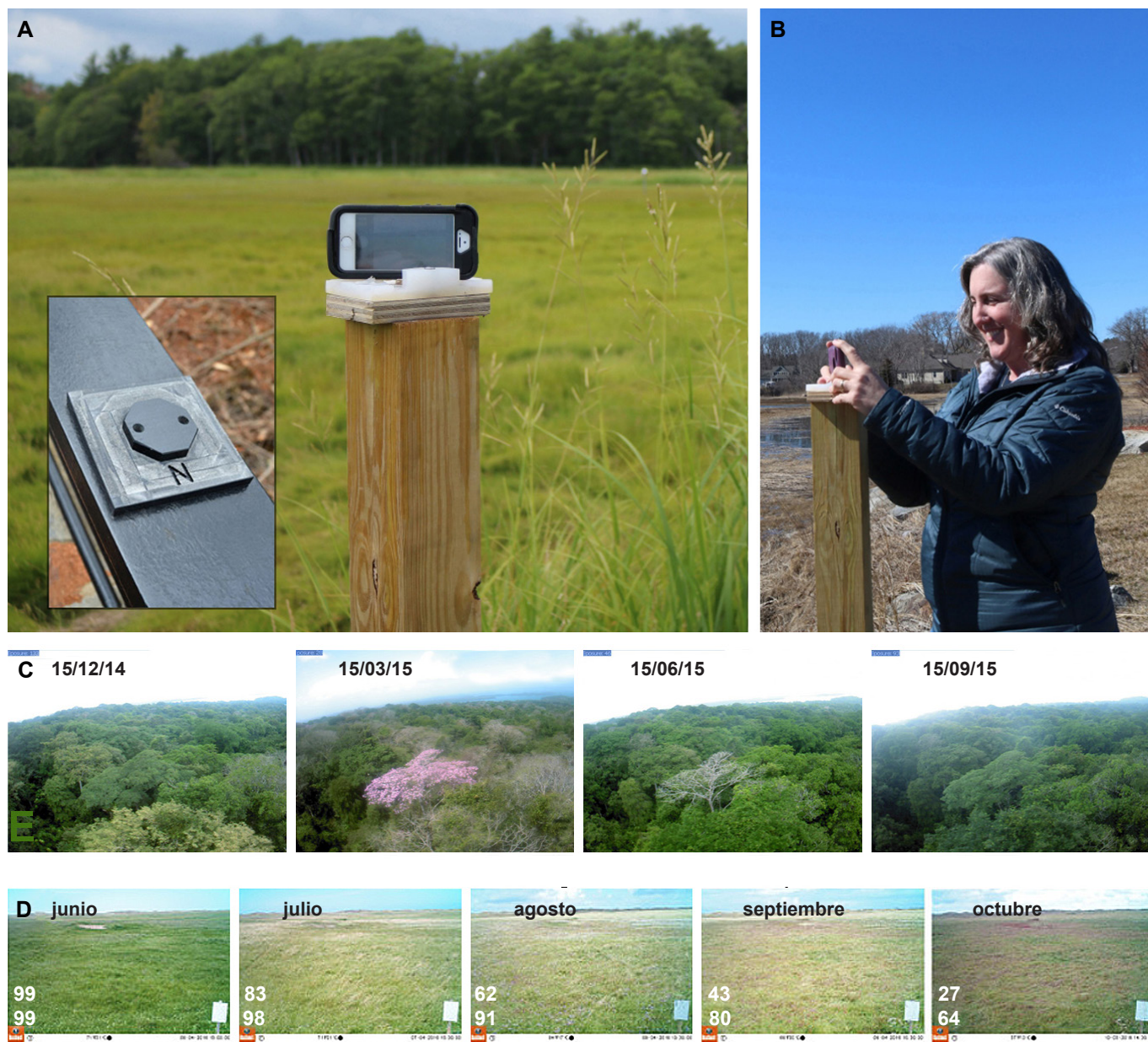
**Fig. 1.** Aplicaciones de teléfonos inteligentes que usan la cámara digital para mediciones en investigaciones y monitoreo de plantas. **A.** *BioLeaf* (Brandoli & al. 2016) para niveles de herbivoría. **B.** *Leaf-IT* (Schrader & al. 2017) para área de las hojas. **C.** *Canopeo* (Patrignani & Ochsner 2015) para área cubierta por vegetación. **D.** *VitiCanopy* (De Bei & al. 2016) para propiedades del follaje. **E.** *Canopy Cover Free* (Fuentes & al. 2014) para densidad de la canopia. **F.** *PocketLAI* (Confalonieri & al. 2014) para el índice de área foliar. **G.** *vitisFlower* (Aquino & al. 2015) para contar flores en un racimo. **H.** *FruitSize* (Wang & al. 2018) para frutas. **I.** *Photo Count* para contar objetos en fotografías. **J.** *%Cover* (*Canopy Assessment Tool* 2017) para cobertura del follaje.

**Fig. 1.** Smartphone apps that use the digital camera for measurements in plant researches and monitoring. **A.** *BioLeaf* (Brandoli & al. 2016) to assess herbivory levels. **B.** *Leaf-IT* (Schrader & al. 2017) to estimate leaf area. **C.** *Canopeo* (Patrignani & Ochsner 2015) to estimate vegetation cover. **D.** *VitiFlower* (Aquino & al. 2015) for counting flowers. **E.** *Canopy Cover Free* (Fuentes & al. 2014) to evaluate canopy density. **F.** *PocketLAI* (Confalonieri & al. 2014) for measuring foliar area index. **G.** *vitisFlower* (Aquino & al. 2015) for counting flowers in a bunch. **H.** *FruitSize* (Wang & al. 2018) for fruit measurement. **I.** *Photo Count* for counting objects in pictures. **J.** *%Cover* (*Canopy Assessment Tool* 2017) to assess foliage cover.

El principio es muy simple: en estas bases se toman ocho fotografías en ángulos fijos que cubren en 360° el paisaje alrededor, así como una fotografía del cielo, y se suben a un sitio web. Con la acumulación de fotografías a lo largo del año es posible, por métodos de análisis comparativo de las imágenes, extraer los indicadores de cambio de la vegetación. Estas fotografías en tierra se complementan con imágenes satelitales del mismo sitio y en el mismo periodo, y son muy efectivas para investigaciones (ej.: Sonnentag & al. 2012, Klosterman & al. 2014, Nijland & al. 2016, Vrieling & al. 2018).

### Estudios de coloración con celulares

La coloración en animales y plantas presenta múltiples funciones ecológicas, por lo que tener una vía estandarizada para lograr su cuantificación es importante. Los estudios que dependen de evaluaciones de color no se deben realizar a simple vista por las múltiples distorsiones espectrales asociadas a la visión humana. Existen espectrofotómetros comerciales objetivos y precisos, pero son equipos caros y a veces difíciles de usar en animales móviles (Endler 1990, Johnsen 2016).



**Fig. 2.** Uso de las cámaras de celulares para estudios de fenología a partir de fotografías repetidas en el tiempo desde puntos fijos. **A.** Base fija con placa de guía para la ubicación y orientación de las cámaras o teléfonos celulares. **B.** Persona que toma las fotografías. **C.** Secuencia de imágenes que muestra variaciones estacionales en vegetación boscosa. **D.** Secuencia mensual de fotografías de un de pastizal. Fotos: Staggemeier & al. 2020.

**Fig. 2.** Use of smartphone cameras to phenological studies from repeated pictures from fixed locations. **A.** Fixed post with a support and orientation base for digital cameras or smartphones. **B.** Visitor taking pictures. **C.** Image sequence showing seasonal variation in a forest. **D.** Monthly sequence of pictures in a grassland. Photos: from Staggemeier & al. 2020.

Desde hace tiempo, Stevens & al. (2007) sugirieron el empleo de fotografías digitales estandarizadas y la descomposición RGB, CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow and Key*) o el espacio de color *CIE Lab*, como métodos de medición más precisos de los colores, para minimizar la subjetividad de las evaluaciones visuales. Potash & al. (2020) compararon el *NixTM Pro Digital Color Sensor* con el uso de fotografías estandarizadas y obtuvieron una correlación fuerte entre el sensor y las fotografías que apoya la efectividad de estas. La facilidad y precisión relativa de este método lo ha hecho popular en este tipo de estudios.

Las cámaras de los celulares están bien preparadas para medir la coloración que es vista por el ser humano (Johnsen 2016) e incluso es posible modelar los niveles digitales para ajustarlos a sistemas visuales no humanos (Gerald & al. 2001). Con programas modernos las mediciones de color a partir de las fotografías pueden ser muy precisas (Troscianko & Stevens 2015) y los estudios de este tipo han aumentado en años recientes (Stevens & al. 2007).

Para medir el color con precisión hay que estandarizar las diferencias en condiciones de iluminación (Stevens & al. 2007), bien en ambientes controlados o con láminas de color estandarizadas (Bergman & Beehner 2008), aunque hay nuevas técnicas que no requieren los ajustes *post hoc*. Nixon & al. (2020) propusieron un nuevo método que lleva una simple calibración única para considerar variaciones inter-equipos y un algoritmo de sustracción de luz ambiental con un par de imágenes con y sin flash.

Una aplicación importante para biólogos está en la posibilidad de evaluar las concentraciones de pigmentos, particularmente de clorofila, en las hojas de las plantas. La concentración de clorofila se relaciona directamente con la productividad fotosintética y con el estado de salud de las plantas. El método

estándar para su medición es por extracción química y espectrometría en el laboratorio mediante la ecuación de Von Wettstein (1957). Pero este método es costoso en tiempo y trabajoso, por lo que es difícil de aplicar a muchas muestras. Existen sensores comerciales para uso en el campo (Uddling & al. 2007) que son equipos caros. Sin embargo, el procesamiento digital de imágenes es una técnica que ha sido probada y es eficiente para medir la clorofila (Vollmann & al. 2011), ya que las intensidades de color verde y sus tonalidades tienen fuertes correlaciones con sus concentraciones reales (Özreçberoğlu & Kahramanoğlu 2020). Como el color de las hojas también se correlaciona con el contenido de nitrógeno, las fotografías digitales han sido usadas para identificar necesidades de fertilización en varias especies de plantas de valor económico, como el arroz (Tao & al. 2020) (Figura 3A), maíz, tomates, lechugas, trigo y espinaca (ej.: Rorie & al. 2011, Baresel & al. 2017, Agarwal & Dutta 2018).

Rigon & al. (2016) emplearon las cámaras de celulares para medir la concentración de clorofila en plantas de un invernadero. Además, se han aplicado métodos de aprendizaje de máquina para aumentar la efectividad de las estimaciones a partir de fotografías en varias especies de plantas (ej.: *Eruca sativa* Mill., Cavallo & al. 2017), y se han probado efectivos en condiciones de campo (Rehman & al. 2019). El uso de estas láminas de color estándares (*Standard leaf color chart - LCC*) como referencia es una práctica agrícola común en muchos países y cultivos (Witt & al. 2005), y se ha automatizado en aplicaciones de celulares (Prilanti & al. 2014, Patrício & Rieder 2018, Chung & al. 2018).

Vesali & al. (2015) desarrollaron una aplicación que evalúa el contenido de clorofila en hojas de maíz a través de fotografías por contacto (con las hojas pegadas a la lente) en las cuales se captura la luz transmitida. Con dos modelos opcionales, uno lineal y una red neural, se puede estimar la concentración que



**Fig. 3.** Ejemplos de utilización de las cámaras de los celulares en aplicaciones de medición de color y colorimetría. **A.** Dispositivo utilizado por Tao & al. (2020) para evaluar el contenido de nitrógeno en hojas de arroz. **B.** Aplicación para la estimación del contenido de clorofila en hojas de maíz (Vesali & al. 2015). **C.** Aplicación para determinar la concentración de cloro en el agua (Sumriddetchkajorn & al. 2014). **D.** Dispositivo creado por Shahvar & al. (2020) para evaluar la concentración de agua en el etanol. **E.** Modelo cuantitativo colorimétrico desarrollado por Chanu & al. (2020) para la medición de pH con papel pH-metro y la cámara de celulares.

**Fig. 3.** Examples of smartphone-based color assessment and colorimetric applications. **A.** Device used by Tao & al. (2020) to determine nitrogen content in rice leaves. **B.** App for chlorophyll concentration assessment in corn leaves (Vesali & al. 2015). **C.** Smartphone app to determine chloride concentration in water samples (Sumriddetchkajorn & al. 2014). **D.** Device designed by Shahvar & al. (2020) to assess water concentration in ethanol. **E.** Quantitative colorimetric model developed by Chanu & al. (2020) for pH estimation using sensitive paper and smartphone cameras.

se convierte a valores SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) (Figura 3B). Hassanijaliliana & al. (2020) desarrollaron un método para monitorear la clorofila en soja (*Glycine max* (L.) Merr.), con valor para la detección de enfermedades como la clorosis por deficiencia de hierro (IDC), que produce cambios de color.

De las imágenes digitales se pueden calcular otros índices de color para estudios de vegetación (Karcher & Richardson 2003). *ImScope* (2019) es una herramienta experimental dedicada a evaluar indicadores de salud de plantas por medio de índices espectrales, por ejemplo, el GRI (*green-red index*) y GBI (*green-blue index*). También utiliza filtros para explotar la pequeña porción de radiación que atraviesa el filtro NIR (*Near Infrared*) de las cámaras de los celulares y así calcular índices con el infrarrojo cercano, como el *NRG* (*NI-red-green*), *NGB* (*near-infrared, green, blue*) y *NDVI* (*normalized difference vegetation index*).

El análisis de color no se restringe a aplicaciones en el campo. Song & al. (2019) desarrollaron un sistema que empleaba la cámara del celular para autenticar alimentos, a partir de un video de alta resolución de la comida bajo luces de colores variables que se procesaba como vector de datos. Evaluado para autenticar aceite de oliva y leche, este sistema tuvo precisiones del 96,2 % y 100 % respectivamente. En otro estudio, Cruz-Fernández & al. (2017) utilizaron las cámaras de celulares para medir el contenido de grasa en productos cárnicos conservados, también por la descomposición en canales RGB.

### Colorimetría analítica basada en celulares

La descomposición de los colores en las fotografías digitales y su cuantificación también se ha utilizado para desarrollar métodos de colorimetría química, es decir, aplicaciones bioanalíticas a través de reacciones que producen cambios de color (Vashist & al. 2015, Yang & al. 2018). La colorimetría es un método tradicional para la detección y evaluación de la concentración de muchas sustancias químicas. Las determinaciones colorimétricas analíticas son importantes para muchos usos: desde determinación de pH y glucosa en pruebas de orina, de la concentración de alcohol en la saliva, para detectar enfermedades mediante bandas de prueba con biomarcadores, o para monitorear la calidad del agua (Kilic & al. 2018).

Los ensayos colorimétricos miden el cambio en la intensidad de absorbancia o reflectancia de conjugados, mientras que los basados en fluorescencia detectan la luz emitida desde una muestra bajo excitación (Aydingogan & al. 2019). Estos métodos “la mayoría de las veces” requieren de costosos equipos y protocolos de laboratorio que consumen tiempo y son difíciles de hacer en el campo. El uso de los celulares como sustitutos ha sido un campo muy activo de investigación (ej.: García & al. 2011, Zhang & al. 2016), ya que son consistentes con las tecnologías “verdes” (eco-amigables) al requerir mínimos consumos de agentes químicos y reactivos (Geng & al. 2017).

En estos métodos los teléfonos actúan simplemente al detectar o evaluar el cambio de coloración en reacciones químicas específicas: el sensor CMOS colecta la señal óptica (como imagen) y, a través de un algoritmo implementado en una aplicación, se procesa y el resultado aparece en la pantalla. O sea, el mismo equipo proporciona el sistema de detección, la fuente de luz y el procesador de datos; además, desde el punto de vista práctico son equipos pequeños, portables, económicos y disponibles. Esto permite realizar los análisis *in situ*, lo que disminuye los riesgos de traslado de muestras, contaminación o ruptura (Martinez & al. 2008).

Sumriddetchkajorn & al. (2014) propusieron un método de colorimetría para evaluar la concentración de cloro en el agua mediante la cámara de un celular (Figura 3C). El agua se mezcla con una solución de almidón y KI que se torna azul en dependencia del cloro presente y la cámara cuantifica el nivel de color con la aplicación *Cl-App* programada para ello. Por otra parte, Shahvar & al. (2020) desarrollaron un simple dispositivo colorimétrico asociado a un celular para evaluar la concentración de agua en el etanol, basados en el cambio de intensidad del color azul del cloruro de cobalto percibido por la cámara frente al contenido de agua (Figura 3D). Con un procedimiento semejante, Franco & al. (2017) evaluaron con alta precisión la concentración de metanol en el jugo de caña: la asociación entre la señal óptica del celular y la concentración real tuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,998.

Chanu & al. (2020) desarrollaron un sistema cuantitativo colorimétrico de medición de pH con la cámara de celulares y papel pH-metro, luego de demostrar que la tonalidad (*Hue*) de las fotografías tiene un comportamiento exponencial muy estrechamente asociado al pH ( $R^2 = 0,99$ ) (Figura 3E). La colorimetría apoyada en celulares se ha utilizado para la detección de flúor (Levin & al. 2016), de contaminantes metálicos (Wei & al. 2014) y pesticidas (Mei & al. 2016). Siddiqui & al. (2018) demostraron la utilidad de este procedimiento para detectar las concentraciones de arsénico en suelos contaminados. También se han empleado en monitoreos de la calidad del aire (Yang & al. 2016) y para caracterizar el color del suelo (escala Munsell) (Fan & al. 2017).

### Uso de las cámaras de los celulares en espectrofotometría y evaluación de radiaciones ultravioletas (UV)

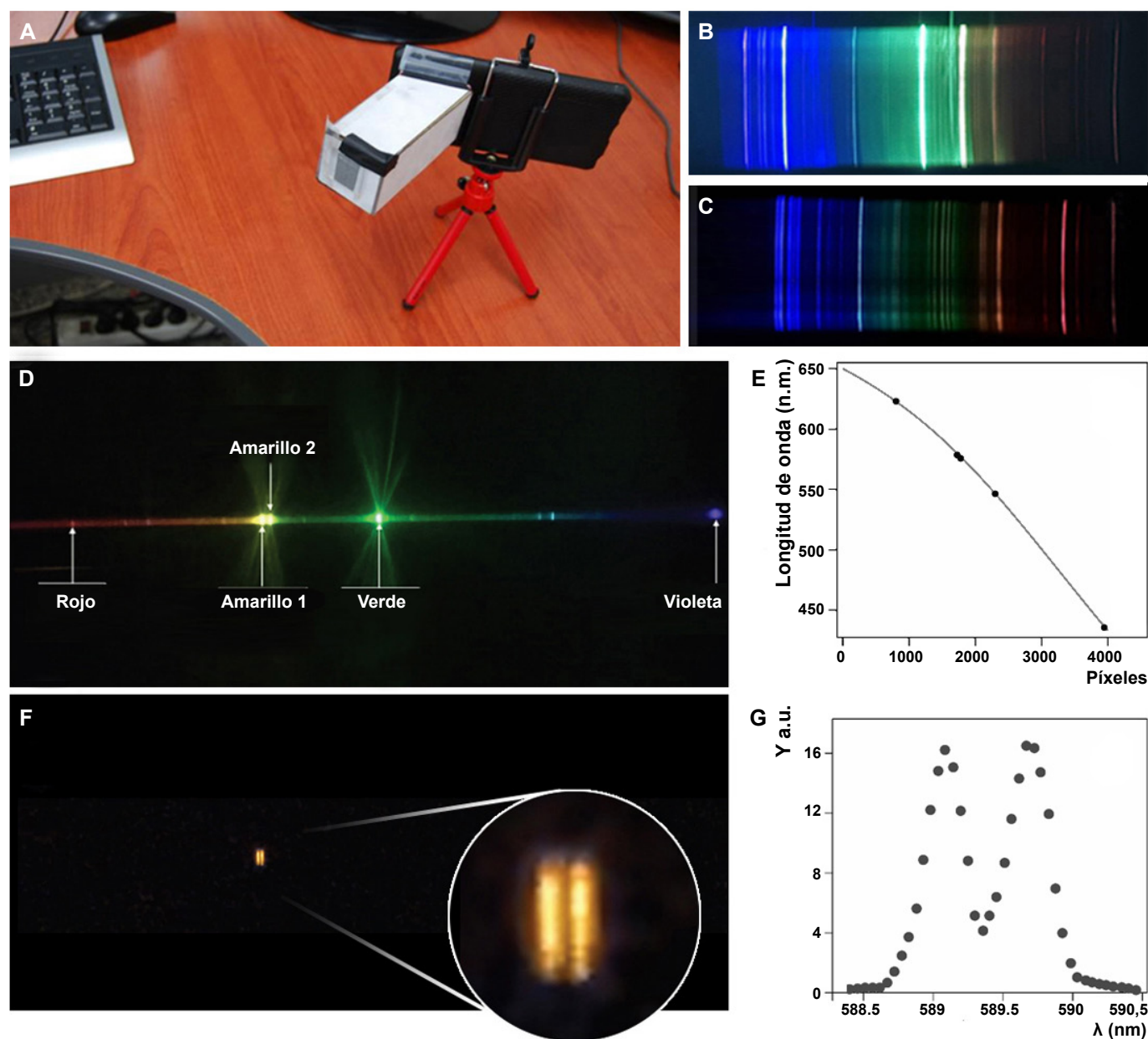
Más allá de la simple descomposición en canales de color, a través de acoplar simples dispositivos ópticos externos (como lentes, filtros y sistemas de dispersión de la luz) se pueden adaptar las cámaras de los celulares para que funcionen como espectrofotómetros de alta precisión capaces de medir las propiedades espectrales de la luz (Wang & al. 2016, Pfaender & al. 2020) (Figura 4). Esto ha generado recientemente altas expectativas para aplicaciones que permitan la determinación de la composición química de sustancias en el campo (McGonigle & al. 2018). Rodrigues & al. (2016) y Pfaender & al. (2020), entre otros, han propuesto variantes de diseños para el uso de celulares en espectroscopía que solo requieren de rejillas de difracción de bajo costo (incluidas secciones

de DVD (Disco Versátil Digital) desechados – Wang & al. 2016), la cámara del propio equipo y aplicaciones específicas (ej.: *Tracker*).

Ju (2020) brindó el diseño de un espectrómetro de alta resolución que se hace con un *papercraft*, un fragmento de DVD y un celular, que es capaz de alcanzar altas resoluciones espectrales (Figura 4A). Para hacer mediciones espectrales

precisas se requiere de una calibración de las longitudes de ondas (Rodríguez & al. 2016) a partir de fuentes de luz de espectros conocidos, como por ejemplo, las lámparas de mercurio (Hg).

Snik & al. (2014) desarrollaron un aditivo simple para aplicaciones de espectro-polarimetría en los teléfonos, capaz de detectar y medir aerosoles atmosféricos, y lo probaron a gran



**Fig. 4.** Empleo de cámaras digitales de celulares inteligentes como dispositivos de espectrofotometría. **A.** Modelo de espectrómetro diseñado por Ju (2020). **B.** Espectro de emisión de una lámpara de mercurio. **C.** Espectro de emisión de una lámpara de neón. **D.** Procedimiento de calibración con una lámpara de mercurio, de espectro conocido, que muestra de forma visible las cinco líneas de máxima emisión y longitud de onda ( $\lambda$ ) conocida. **E.** Con la aplicación *Tracker* se mide la posición en píxeles, se grafica contra  $\lambda$ , y se obtiene la curva polinómica de calibración. **F.** Espectro de emisión del sodio (Na) (la ampliación permite resolver el doblete). **G.** Luminancia vs longitud de onda.

**Fig. 4.** Use of smartphone digital cameras as spectrophotometric devices. **A.** Inexpensive device model designed by Ju (2020). **B.** Emission spectrum of an mercury lamp. **C.** Emission spectrum of a Ne lamp. **D.** Calibration procedure with an Hg lamp of known spectrum, visibly showing five maximum emission lines of known wavelength ( $\lambda$ ). **E.** With *Tracker* app the position in pixels is retrieved and plotted against  $\lambda$ , to obtain a polynomial calibration curve. **F.** Emission spectrum of sodium (Na) (zoom to resolve the doublets). **G.** Luminance plotted against wavelength.

escala en un proyecto de ciencia ciudadana para mapear esta variable en Holanda. Mediante la espectrometría también se han desarrollado y utilizado, en monitoreos de calidad del agua en ríos, dispositivos portables asociados a aplicaciones de celulares para medir el pH (Dutta & al. 2015) y la salinidad (Hussain & al. 2017) (con sensibilidad de 0,1 ppm).

Las capacidades de las cámaras de los celulares también se pueden extender más allá de la luz visible. Un campo emergente en los sensores móviles asociados a las cámaras se relaciona con el monitoreo de la radiación ultravioleta (Turner & al. 2019). Esta radiación es entre el 8–9 % del espectro solar al tope de la atmósfera y el 5 % en la superficie, y tiene efectos negativos marcados en la salud humana. La mayoría de los teléfonos no contienen receptores para UV, aunque *Samsung* incluyó un sensor para esta radiación en el modelo *Samsung Gear S*, pero no en los modelos siguientes al S2 (Mei & al. 2017). Sin embargo, los sensores CMOS son capaces de detectar la radiación UV (Igoe & al. 2013), solo que, desafortunadamente, las cámaras contienen aditamentos ópticos para protegerlos de esta radiación y priorizar la luz visible. Estudios han encontrado que incluso pueden detectar otras radiaciones de alta energía como rayos X y gamma (Kang & al. 2016). A pesar de esto, las imágenes capturadas con los CMOS de los celulares inteligentes permiten la estimación de la radiación UV (Mei & al. 2017). Ya desde 2014, Patel & al. (2015) habían reportado un incremento en las aplicaciones de celulares enfocadas en esta radiación e identificado 34 de ellas.

Pero la detección de las radiaciones UV con los celulares no solo han dependido de los sensores integrados, sino que se han desarrollado paralelamente múltiples sensores externos portables que se comunican con los teléfonos. Estos son parte de la llamada *wearable technology* y existen numerosos modelos y marcas. Banerjee & al. (2017) revisaron un grupo de estos sistemas y correlacionaron sus lecturas con radiómetros calibrados.

#### **Aplicaciones de Sistemas de Identificación Automatizada**

Los sistemas de visión computarizada y reconocimiento de patrones están dentro de las líneas de mayores avances en el campo de la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina. Las aplicaciones de celulares con guías de identificación siempre han tenido un fuerte uso como apoyo en contextos educativos (Kurniawan & al. 2017) y aumentan las habilidades de identificación de los estudiantes (Thomas & Fellowes 2016). En algunos grupos de insectos, el empleo de imágenes digitales para la identificación es práctica común en centros de bioseguridad (ej.: Disbury & al. 2008) y puede ser de alta precisión en algunos casos como en mosquitos (Braz-Sousa & al. 2019). En base a esto, varios países han desarrollado proyectos de monitoreo de mosquitos a través de aplicaciones de celulares (enfoque de ciencia ciudadana) (ej.: Montgomery & al. 2017, Palmer & al. 2017, Walther & Kampen 2017).

Pero más allá de un apoyo pasivo en la toma de fotos que luego son procesadas por taxónomos, el desarrollo de los

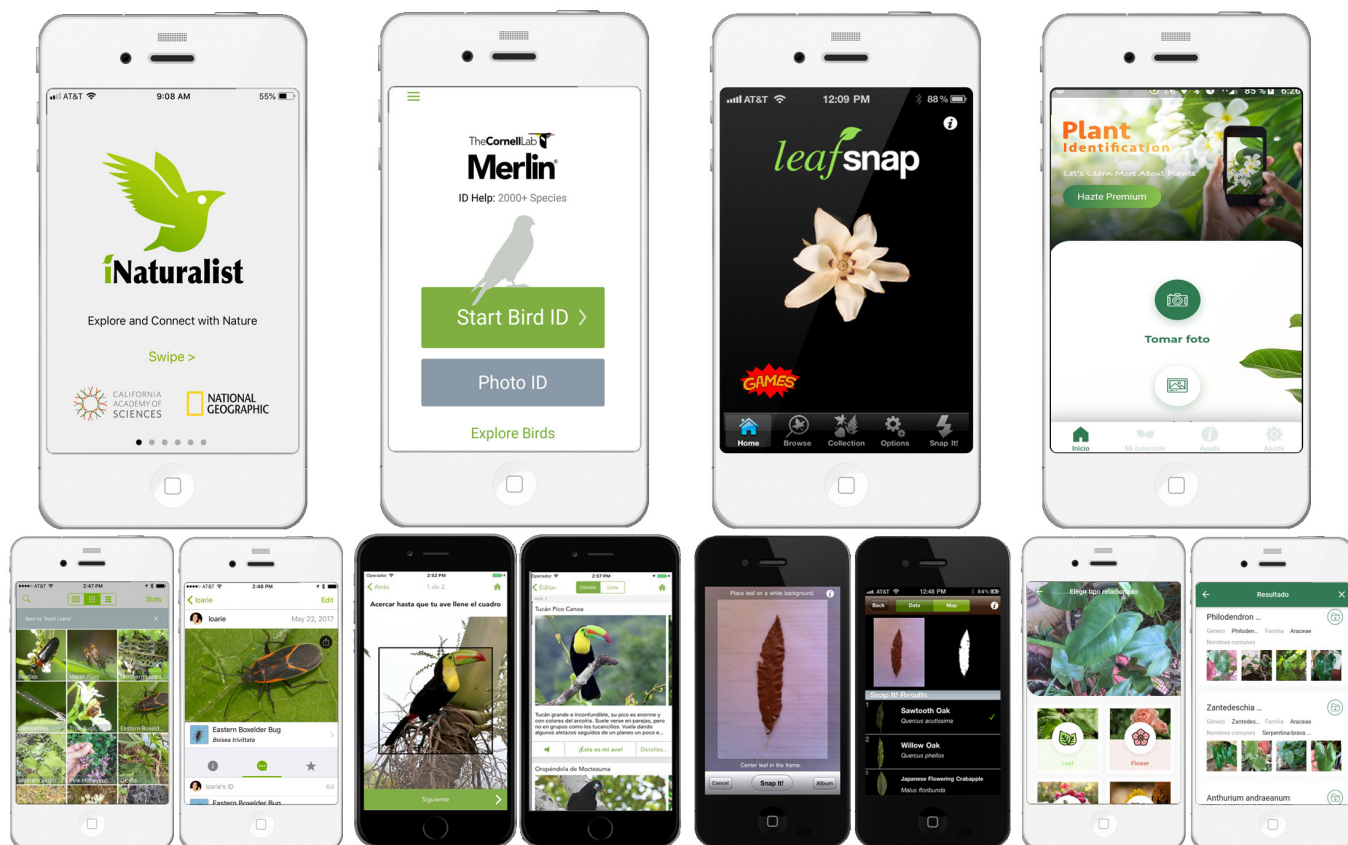
métodos de inteligencia artificial ha logrado algoritmos de muy alta eficiencia para identificar objetos: los Sistemas de Identificación Automatizada de especies (MacLeod & al. 2010). Numerosas aplicaciones de celulares emplean estos algoritmos para identificar las especies a través de las cámaras fotográficas. Ejemplos de ello son *LeafSnap* (Kress & al. 2018), *iNaturalist* (Van Horn & al. 2018) y *Merlin Bird ID* (2018) (Figura 5). Kurniawan & al. (2017) desarrollaron una aplicación de *Android* llamada *i-Bird* para ayudar a identificar aves. Nyaga (2019) desarrolló un modelo de aprendizaje profundo (*Deep learning*) con una CNN (*Convolutional Neural Network*) entrenada con 39 031 fotografías de aves de Kenya, que logró una precisión de identificación del 97,3 % y que fue implementada en una aplicación que se ejecuta en el propio teléfono. También Falzon & al. (2020) desarrollaron *ClassifyMe*, una aplicación de identificación automatizada de especies animales para cámaras trampa.

#### **Aplicaciones biomédicas de las cámaras de los celulares**

Uno de los campos donde la fotografía digital con celulares ha tenido un mayor desarrollo e impacto social ha sido en el de la biomedicina y la salud. Las cámaras de alta calidad de los celulares desempeñan un rol crucial como biosensores ópticos, ya que prácticamente todos los métodos de laboratorio basados en óptica pueden integrarse a ellas. Existen desde interfaces para recibir imágenes médicas (de equipos de rayos X, de resonancia magnética nuclear) hasta métodos de absorbancia, reflectancia, fluorescencia, *surface plasmon resonance* (SPR), bio-quimioluminiscencia y electro-quimioluminiscencia (Geng & al. 2017, Guner & al. 2017).

En esta era de la información, las tecnologías de asistencias sanitarias han ido moviéndose desde los laboratorios centralizados hacia dispositivos diagnósticos rápidos o inmediatos (*point-of-care diagnostic devices*, POC); sobre todo con el desarrollo de la micro y nanotecnología, el cómputo en la nube, el procesamiento de señales y la microelectrónica (Liu & al. 2019). Para automatizar e integrar los diagnósticos rápidos con las opiniones profesionales, los teléfonos celulares aparecen como las opciones obvias, pues están equipados con todo lo necesario: potentes cámaras y procesadores, conectividad inalámbrica, capacidades de análisis en tiempo real o en la nube, seguridad de datos, etc. (Wang & al. 2016). Desde inicios de siglo emergió el concepto de "*mobile health*" (*mHealth*) para referirse a las relaciones entre doctores y pacientes a través de interfaces digitales mediadas por dispositivos electrónicos móviles (Martínez-Pérez & al. 2013).

Un simple adaptador acoplado a la cámara del celular posibilita el uso de aplicaciones para oftalmología, ya que permite el escaneo de la retina y nervios ópticos, lo cual es importante para diagnosis y monitoreo de varias condiciones como glaucoma, degeneración macular, hipertensión y malaria. Liang & al. (2020) desarrollaron *OralCam*, una aplicación interactiva para auto monitoreo del estado de salud de la boca y dentadura que identifica enfermedades o síntomas odontológicos. Relacionado a la microscopía con celulares, Zheng & al. (2018) desarrollaron un dispositivo portable y de bajo costo para



**Fig. 5.** Ejemplos de aplicaciones de Sistemas de Identificación Automatizados de Especies que utilizan las cámaras fotográficas de celulares inteligentes.

**Fig. 5.** Examples of Automated Species Identification System apps that use smartphone cameras.

conteo de células. Concerniente a la colorimetría, Aydinoglan & al. (2019) implementaron un inmunoensayo para la detección de cáncer mediante la bioconjugación de nanopartículas de oro a anticuerpos específicos sobre una membrana de nitrocelulosa y la detección del cambio colorimétrico con un celular. Este sistema portable fue probado con alpha-fetoproteína y mucin-16, marcadores proteicos conocidos de cáncer de ovario e hígado. De esta forma muchas moléculas biológicas como enzimas (Calabria & al. 2017), ácidos nucleicos (Xu & al. 2019), antígenos y anticuerpos (Ludwig & al. 2015) pueden ser detectadas con teléfonos celulares. Otros ejemplos interesantes han sido el empleo de un dispositivo de microscopía de fluorescencia para análisis moleculares en la detección de mutaciones (Punitha & al. 2017), así como otros dispositivos para detectar en tiempo real la presencia de proteínas del virus del Zika (Rong & al. 2019).

Con estas tecnologías basadas en un celular pueden detectarse células (Zheng & al. 2018) y microorganismos (Park & al. 2013). Lia & al. (2020) desarrollan un sensor rápido para determinar dos tipos de bacterias en la saliva (*Streptococcus salivarius* y *S. sanguinis*) mediante bandas de prueba con SiC Qds (*blue-emitting silicon carbide quantum dots*) y AuNCs (*red-emitting gold nanoclusters*), una luz UV y la cámara del celular para detectar el color. Otros dispositivos de diagnóstico

con cámaras de celulares y algoritmos de aprendizaje profundo se han utilizados para análisis automatizado de semen (Kanakasabapathy & al. 2017) y para la detección de varios tipos de carcinomas (Skandarajah & al. 2017).

Un ejemplo, representativo de cómo procesos fisiológicos complejos pueden evaluarse de forma simple con las cámaras celulares está en la propuesta desarrollada por Alafeef & Fraiwan (2020) para medir la tasa respiratoria. Este es uno de los signos vitales básicos más importantes que se emplean para evaluar el estado de salud de un paciente y se relaciona directamente con las condiciones del sistema respiratorio, y con signos de enfermedades como desórdenes cardiopulmonares, disfunciones respiratorias y del sueño (Cretikos & al. 2008). Esta se puede medir de forma manual (altamente imprecisa) o con métodos e instrumentos especializados como oxímetros, termistores nasales, espirometría, pneumografía, pletismografía o capnografía. Sin embargo, estos dependen de equipos caros no siempre disponibles, pueden ser incómodos para los pacientes, muchos no son portables y solo pueden ser manipulados por personal especializado (Bailon & al. 2006). No obstante, se puede estimar la tasa respiratoria con una técnica llamada foto-pletismografía (PPG). La PPG se basa en la onda pulsátil que se obtiene a partir de la luz reflejada o transmitida por la piel mediante luz roja o infrarroja

(ej.: en un dedo o en el lóbulo de la oreja). Esta onda contiene varios componentes de frecuencia que se relacionan con la actividad respiratoria, presión sanguínea y pulsaciones del corazón (Meredith & al. 2012). La pletismografía es la base de numerosos dispositivos portables de diagnóstico y monitoreo sanitarios que se han desarrollado en la actualidad, como relojes, pulseras o anillos. Alafeef & Fraiwan (2020) desarrollaron una aplicación basada en la cámara de los celulares a partir de registrar un video de la superficie del dedo mientras se oprime la superficie del lente y el flash ilumina. A partir de este video, se extrae una señal foto-pletismográfica en los canales RGB a la cual se le aplica una transformación *wavelet* discreta y se puede estimar la tasa respiratoria. Estos autores demostraron el valor del método con un *Samsung Galaxy S6*, y tres controles de forma paralela: un equipo dedicado profesional estándar para pletismografía, un sensor de flujo de aire y un observador especializado con un cronómetro. La tasa respiratoria se estimó con un error cuadrático medio de 0,36 inspiraciones/min, que llevado a porcentaje, es del 2,2 %, por lo que la precisión de la aplicación es del 97,8 %.

#### Otras aplicaciones de las cámaras de los celulares

Como las cámaras de los teléfonos no solo recogen fotografías fijas sino también videos de alta resolución, con aplicaciones apropiadas se pueden transformar en sistemas de detección de movimiento o cámaras-trampa. Estas últimas fueron originalmente diseñadas como equipos de seguridad en viviendas y negocios, pero rápidamente migraron al estudio de la vida silvestre y se han convertido en herramientas básicas para el estudio de la megafauna (McKeon & al. 2020). Un celular colocado frente a una jaula, terrario o acuario puede ser fácilmente programado para la toma de fotografías o videos regularmente, a intervalos fijos, o incluso activables por la detección de movimiento, con lo cual queda en las imágenes la marca del tiempo (hora) de la actividad. Con ello pueden ser realizados estudios conductuales sin la necesidad de que el investigador invierta su tiempo en la observación en tiempo real, a la vez que minimiza el efecto disruptivo de su presencia. El seguimiento por video de los animales en estudios de conducta ha sido exitosamente desarrollado por Kross & Nelson (2011) y Pennekamp & Schtickzelle (2013). Steen (2017) empleó la aplicación *Videography*, con detección de movimiento, para el monitoreo de la conducta de aves mediante celulares fijos como cámaras-trampa, y que al conectarse a internet subían los videos automáticamente a *Dropbox*. Un celular también puede colocarse frente a un germinador o bandeja de enraizamiento y registrar periódicamente, en intervalos programados, el proceso de crecimiento de las plantas y hacer cálculos relacionados con el proceso de elongación y actividad meristemática.

El advenimiento de la realidad virtual y la realidad aumentada no ha llegado sin influencia para los teléfonos celulares. Aplicaciones fotogramétricas para reconstrucciones en tres dimensiones (3D) se han empleado en estudios biomédicos (Kolev & al. 2014, Fritsch & Syll 2015). Marzulli & al. (2020) desarrollaron un estudio con un algoritmo fotogramétrico de reconstrucción 3D a partir de fotografías tomadas con un

celular en una parcela boscosa para estimar parámetros dendrométricos de los troncos, como el diámetro a la altura del pecho y el volumen de madera, a partir de las nubes de puntos obtenidas.

Por su poco peso, los celulares se han colocado en vehículos aéreos no tripulados (drones) para la toma remota de fotografías u otras variables a elevadas alturas, o han servido como controladores remotos en muchos modelos. Estos drones son una tecnología emergente de amplias potencialidades para el monitoreo ambiental y la investigación (Hardin & al. 2018). Hay antecedentes de estudios que han empleado aplicaciones de las cámaras de celulares para evaluaciones de hábitat a partir de fotos aéreas (Getzin & al. 2012). También están en desarrollo algoritmos avanzados de inteligencia artificial para el reconocimiento de imágenes por los drones a través de celulares (Martinez-Alpiste & al. 2019).

#### CONSIDERACIONES FINALES

Las cámaras fotográficas digitales son los sensores más ampliamente empleados en los teléfonos inteligentes (Kwon & Park 2017) con potencialidades aún en desarrollo. Para su aplicación científica poseen múltiples ventajas, pero por su novedad y la complejidad tecnológica subyacente no deben emplearse a la ligera. Para cualquier uso como herramientas de medición precisas, al igual que sucedería con las cámaras tradicionales, las cámaras de los celulares requieren inicialmente de una calibración y caracterización de la respuesta (Wu & al. 2010), sobre todo en relación a la temperatura, que produce el llamado *dark noise* (Igoe & al. 2018). Esto se debe hacer con luces de longitud de onda conocidas o con filtros ópticos y diseños cuidadosamente planificados.

A pesar de su valor, aún persisten limitaciones. Entre ellas, que el pequeño tamaño de las pantallas limita la cantidad de información que se puede visualizar en cada momento y puede ser una molestia para personas con dificultades visuales. Otra dificultad está dada por la gran diversidad y diferencias entre los numerosos modelos de teléfonos. Wiechmann & al. (2016) llaman la atención de la dificultad de encontrar aplicaciones relevantes en el campo biomédico, lo cual se extrapola a cualquier otro campo. La búsqueda de aplicaciones confiables es complicada por lo amplio del universo de búsqueda: en el primer trimestre de 2020 existían en *Play Store* 2,56 millones de aplicaciones, 1,85 millones en *Apple App Store* y 489 000 en *Amazon Appstore* (Statista 2020). Sin embargo, solo una proporción pequeña está validada científicamente o respaldada por publicaciones arbitradas. Independientemente de las posibles limitaciones, las cámaras fotográficas de los teléfonos inteligentes son y serán, de forma predecible, uno de los más importantes elementos de valor añadido de estos instrumentos portables y uno de los auxiliares más útiles para los biólogos en sus investigaciones.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

D. Denis concibió la idea original. Todos los autores condujeron la búsqueda y revisión de la literatura, aportaron contenidos y revisaron la versión final.

## CUMPLIMIENTO DE NORMAS ÉTICAS

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

**Aprobación de ética:** Todos los autores han llevado a cabo el trabajo de campo y la generación de datos de forma ética, incluida la obtención de permisos adecuados.

**Consentimiento para la publicación:** Todos los autores han dado su consentimiento para publicar este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agarwal, A. & Dutta, S. 2018. Assessment of spinach seedling health status and chlorophyll content by multivariate data analysis and multiple linear regression of leaf image features. *Comput. Electron. Agric.* 152: 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.048>

AI Timelines. 2017. AI Impacts. <https://aiimpacts.org/recent-trend-in-the-cost-of-computing/>. 30 de septiembre 2020.

Alafeef, M. & Fraiwan, M. 2020. Smartphone-based respiratory rate estimation using photoplethysmographic imaging and discrete wavelet transform. *J. Ambient. Intell. Human. Comput.* 11: 693-703. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01339-6>

Aquino, A., Barrio, I., Diago, M.P., Millan, B. & Tardaguila, J. 2018. vitisBerry: An Android-smartphone application to early evaluate the number of grapevine berries by means of image analysis. *Comput. Electron. Agric.* 148: 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.021>

Aquino, A., Millan, B., Gaston, D., Diago, M.P. & Tardaguila, J. 2015. vitisFlower: development and testing of a novel Android-smartphone application for assessing the number of grapevine flowers per inflorescence using artificial vision techniques. *Sensors* 15: 21204-21218. <https://doi.org/10.3390/s150921204>

Aydindogan, E., Ceylan, A.E. & Timur, S. 2019. Paper-based colorimetric spot test utilizing smartphone sensing for detection of biomarkers. *Talanta* 208: 120446 <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120446>

Bailon, R., Sornmo, L. & Laguna, P. 2006. A robust method for ecg-based estimation of the respiratory frequency during stress testing. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 53(7): 1273-1285. <https://doi.org/10.1109/TBME.2006.871888>

Banerjee, S., Hoch, E.G., Kaplan, P.D. & Dumont, E.L. 2017. A comparative study of wearable ultraviolet radiometers. Pp. 9-12. En: 2017 IEEE Life Sciences Conference (LSC). <https://doi.org/10.1109/LSC.2017.8268131>

Baresel, J.P., Rischbeck, P., Hu, Y., Kipp, S., Hu, Y., Barneier, G. & Mistele, B. 2017. Use of a digital camera as alternative method for non-destructive detection of the leaf chlorophyll content and the nitrogen nutrition status in wheat. *Comput. Electron. Agric.* 140: 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.032>

Bauer, J., Siegmann, B., Jarmer, T. & Aschenbruck, N. 2016. Smart fLAI: a smartphone application for fast LAI retrieval using ambient light sensors. Pp. 1-6. En: 2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). <https://doi.org/10.1109/SAS.2016.7479880>

Bergman, T.J. & Beehner, J.C. 2008. A simple method for measuring colour in wild animals: validation and use on chest patch colour in geladas *Theropithecus gelada*. *Biol. J. Linn. Soc.* 94: 231-240. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2008.00981.x>

Bolger, D.T., Morrison, T.A., Vance, B., Lee, D. & Farid, H. 2012. A computer-assisted system for photographic mark-recapture analysis. *Methods Ecol. Evol.* 3: 813-822. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2012.00212.x>

Bonhomme, R. & Chartier, P. 1972. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israel J. Agric. Res.* 22: 53-61.

Brandoli, B., Orue, J.P.M., Arruda, M.S., Santos, C.V., Sarath, D.S., Goncalves, W.N., Silva, G.G., Pistori, H., Rilda, A. & Rodrigues Jr, J.F. 2016. BioLeaf: a professional mobile application to measure foliar damage caused by insect herbivory. *Comp. Electr. Agric.* 129: 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.007>

Braz-Sousa, L., Fricker, S.R., Doherty, S.S., Webb, C.E., Baldock, K.L. & Williams, C.R. 2019. Citizen science and smartphone e-entomology enables low-cost upscaling of mosquito surveillance. *Sci. Total Env.* 704: 135349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135349>

Calabria, D., Caliceti, C., Zangheri, M., Mirasoli, M., Simoni, P. & Roda, A. 2017. Smartphone based enzymatic biosensor for oral fluid L-lactate detection in one minute using confined multilayer paper reflectometry. *Biosens. Bioelectron.* 94: 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.02.053>

Canopy Assessment Tool 2017. %Cover. Public Interest Enterprises. AppStore. <https://www.appstore.com/>. 30 de septiembre 2020.

Carpenter, A.E., Jones, T.R., Lamprecht, M.R., Clarke, C., Kang, I.H. & Friman, O. 2006. Cell profiler: image analysis software for identifying and quantifying cell phenotypes. *Genome Biol.* 7: R100. <https://doi.org/10.1186/gb-2006-7-10-r100>

Cavallo, D.P., Cefola, M., Pace, B., Logrieco, A.F. & Attolico, G. 2017. Contactless and nondestructive chlorophyll content prediction by random forest regression: A case study on fresh-cut rocket leaves. *Comput. Electron. Agric.* 140: 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.012>

Chanu, O.R., Kapoor, A., Karthik, V., Chanu, O.R., Kapoor, A. & Karthik, V. 2020. Digital image analysis for microfluidic paper based pH sensor platform. *Materials Today Proc.* 40(1): S64-S68. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.503>

Chung, S., Breshears, L.E. & Yoon, J.Y. 2018. Smartphone near infrared monitoring of plant stress. *Comput. Electron. Agric.* 154: 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.046>

Confalonieri, R., Francone, C. & Foi, M. 2014. The PocketLAI smartphone app: an alternative method for leaf area index estimation. En: Ames, D.P., Nigel W., Quinn, T. & Rizzoli, A.E. (Eds.). Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software. San Diego, California, USA.

Cretikos, M. A., Bellomo, R., Hillman, K., Chen, J., Finfer, S. & Flabouris, A. 2008. Respiratory rate: the neglected vital sign. *Med. J. Aust.* 188(11): 657-659. <https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2008.tb01825.x>

Cruz-Fernández, M., Luque-Cobija, M.J., Cervera, M.L., Morales-Rubio, A. & de la Guardia, M. 2017. Smartphone determination of fat in cured meat products. *Microchem. J.* 132: 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.12.020>

Daponte, P., De Vito, L., Picariello, F. & Riccio, M. 2013. State of the art and future developments of measurements applications on smartphones. *Measurement.* 46: 3291-3307. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.05.006>

De Bei, R., Fuentes, S., Gilliam, M., Tyerman, S., Edwards, E., Bianchini, N., Smith, J. & Collins, C. 2016. VitiCanopy: A free computer App to estimate canopy vigor and porosity for grapevine. *Sensors* 16: 585. <https://doi.org/10.3390/s16040585>

- Disbury, M., Cane, R.P. & Russell, R.C. 2008. Remote identification of exotic mosquito specimens using digital photography. *Austr. J. Entomol.* 47(2): 128-130. <https://doi.org/10.1111/j.1440-6055.2008.00638.x>
- Dutta, S., Sibasish, D. & Nath, P. 2015. Ground and river water quality monitoring using a smartphone-based pH sensor. *AIP Advances* 5(5): 057151. <https://doi.org/10.1063/1.4921835>
- Easlon, H.M. 2016. Canopy Cover Free. Versión 1.0.3. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.heaslon.canopycover>. 29 de agosto 2020.
- Easlon, H.M. & Bloom, A.J. 2014. Easy Leaf Area: automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. *Appl. Plant Sci.* 2: 1400033. <https://doi.org/10.3732/apps.1400033>
- Endler, J.A. 1990. On the measurement and classification of color in studies of animal color patterns. *Biol. J. Linn. Soc.* 41: 315-352. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1990.tb00839.x>
- Evans, G.C. & Coombe, D.E. 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J. Ecol.* 47(1): 103-113. <https://doi.org/10.2307/2257250>
- Falzon, G., Lawson, C., Cheung, K.W., Vernes, K., Ballard, G.A., Fleming, P.J.S., Glen, A.S., Milne, H., Mather-Zardain, A. & Meek, P.D. 2020. ClassifyMe: A Field-Scouting Software for the Identification of Wildlife in Camera Trap Images. *Animals* 10: 58. <https://doi.org/10.3390/ani10010058>
- Fan, Z., Herrick, J.E., Saltzman, R., Matteis, C., Yudina, A., Nocella, N. & Van Zee, J. 2017. Measurement of soil color: a comparison between smartphone camera and the munsell color charts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81(5): 1139-1146. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0009>
- Franco, M.D.O.K., Suarez, W.T., Maja, M.V. & dos Santos, V.B. 2017. Smartphone application for methanol determination in sugar cane spirits employing digital image-based method. *Food Anal. Methods* 10(6): 2102-2109. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0777-y>
- Fritsch, D. & Syll, M. 2015. Photogrammetric 3D reconstruction using mobile imaging. En: *Mobile Devices and Multimedia: Enabling Technologies, Algorithms, and Applications 2015*. International Society for Optics and Photonics. 9411: 94110C. <https://doi.org/10.1117/12.2083332>
- Fuentes, S., Poblete-Echeverría, C., Ortega-Farías, S., Tyerman, S. & De Bei, R. 2014. Automated estimation of leaf area index from grapevine canopies using cover photography, video and computational analysis methods. *Aust. J. Grape Wine Res.* 20: 465-473. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12098>
- García, A., Erenas, M.M., Marinetto, E.D., Abad, C.A., de Orbe-Paya, I., Palma, A.J. & Capitán-Vallvey, L.F. 2011. Mobile phone platform as portable chemical analyzer. *Sens. Actuators B. Chem.* 156: 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.04.045>
- Geng, Z., Zhang, X., Fan, Z., Lv, X., Su, Y. & Chen, H. 2017. Recent progress in optical biosensors based on smartphone platforms. *Sensors* 17(11): 2449. <https://doi.org/10.3390/s17112449>
- Gerald, M.S., Bernstein, J., Hinkson, R. & Fosbury, R.A.E. 2001. Formal method for objective assessment of primate colour. *Am. J. Primatol.* 53: 79-85. [https://doi.org/10.1002/1098-2345\(200102\)53:2%3C79::AID-AJP3%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1098-2345(200102)53:2%3C79::AID-AJP3%3E3.0.CO;2-N)
- Getzin, S., Wiegand, K. & Scheuning, I. 2012. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods Ecol. Evol.* 3: 397-404. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00158.x>
- Guan, L., Tian, J., Cao, R., Li, M., Cai, Z. & Shen, W. 2014. Barcode-Like Paper Sensor for Smartphone Diagnostics: An Application of Blood Typing. *Anal. Chem.* 86: 11362-11367. <https://doi.org/10.1021/ac503300y>
- Guner, H., Ozgur, E., Kokturk, G., Celik, M., Esen, E., Topal, A.E., Ayas, S., Uludag, Y., Elbuken, C. & Dana, A. 2017. A smartphone based surface plasmon resonance imaging (SPRI) platform for on-site biodetection. *Sens. Actuators B Chem.* 239: 571-577. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.061>
- Hardin, P.J., Lulla, V., Jensen, R.R. & Jensen, J.R. 2018. Small Unmanned Aerial Systems (sUAS) for environmental remote sensing: challenges and opportunities revisited. *GScience & Rem. Sens.* 56(2): 309-322. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1510088>
- Hassanijaliliana, O., Iqathinathanea, C., Doetkottb, C., Bajwaa, S., Nowatzkia, J. & Haji, S.A. 2020. Chlorophyll estimation in soybean leaves infield with smartphone digital imaging and machine learning. *Comp. Electr. Agric.* 174: 105433. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105433>
- Hatiboruah, D., Devi, D.Y., Namsa, N.D. & Nath, P. 2020. Turbidimetric analysis of growth kinetics of bacteria in the laboratory environment using smartphone. *J. Biophotonics* 13: e201960159. <https://doi.org/10.1002/jbio.201960159>
- Hiby, L., Paterson, W.D., Redman, P., Watkins, J., Twiss, S.D. & Pomeroy, P. 2013. Analysis of photo-ID data allowing for missed matches and individuals identified from opposite sides. *Methods Ecol. Evol.* 4: 252-259. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12008>
- Hussain, I., Das, M., Ahamad, K.U. & Nath, P. 2017. Water salinity detection using a smartphone. *Sens. Actuators B Chem.* 239: 1042-1050. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.102>
- Igoe, D., Parisi, A.V. & Carter, B. 2013. Characterisation of the UVA response of a smartphone. *Photochem. Photobiol.* 89: 215-218. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2012.01216.x>
- Igoe, D.P., Parisi, A.V., Amar, A. & Rummenie, K.J. 2018. Median filters as a tool to determine dark noise thresholds in high resolution smartphone image sensors for scientific imaging. *Rev. Sci. Instr.* 89(1): 015003. <https://doi.org/10.1063/1.5006000>
- Iliffe, M., Mwinami, T. & Harper, D. 2011. Counting flamingos with a mobile phone - connecting all the flamingo lakes? *Bull. Flamingo Spec. Group* 18: 38-41.
- ImScope*. 2019. Application for Android and An Experimental Tool Oriented to Visualization and Recording of Indicators of Plant Health. [https://www.idoneos.com/procesamiento\\_de\\_imagenes/imscope/imscope\\_\(english\).html](https://www.idoneos.com/procesamiento_de_imagenes/imscope/imscope_(english).html). 26 de septiembre 2020.
- Johnsen, S. 2016. How to measure color using spectrometers and calibrated photographs. *J. Exp. Biol.* 219: 772-778. <https://doi.org/10.1242/jeb.124008>
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. & Baret, F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. Forest. Meteorol.* 121: 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Ju, Y.G. 2020. Fabrication of a low-cost and high-resolution papercraft smartphone spectrometer. *Phys. Educ.* 55: 035005. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab6c3e>
- Kanakasabapathy, M.K., Sadasivam, M., Singh, A., Preston, C., Thirumalaraju, P., Venkataraman, M., & Shafiee, H. 2017. An auto-

- mated smartphone-based diagnostic assay for point-of-care semen analysis. *Sci. Transl. Med.* 9(382): 1-14. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aai7863>
- Kang, H.G., Song, J.-J., Lee, K., Nam, K.C., Hong, S.J. & Kim, H.C. 2016. An investigation of medical radiation detection using CMOS image sensors in smartphones. *Nuclear Instr. Methods Phys. Res. Sect. A* 823: 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.04.007>
- Karcher, D.E. & Richardson, M.D. 2003. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. *Crop Sci.* 43: 943-951. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.9430>
- Kilic, V., Alankus, G., Horzum, N., Mutlu A. Y., Bayram, A. & Solmaz, M.E. 2018. Single-image-referenced colorimetric water quality detection using a smartphone. *ACS Omega* 3(5): 5531-5536. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00625>
- Klosterman, S.T., Hufkens, K., Gray, J.M., Melaas, E., Sonnentag, O., Lavine, I., Mitchell, L., Norman, R., Friedl, M.A. & Richardson, A.D. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery. *Biogeosciences* 11: 4305-4320. <https://doi.org/10.5194/bg-11-4305-2014>
- Kolev, K., Tanskanen, P., Speciale, P. & Pollefeys, M. 2014. Turning mobile phones into 3D scanners. Pp. 3946-3953. En: 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.504>
- Kress, W.J., Garcia-Robledo, C., Soares, J.V.B., Jacobs, D., Wilson, K., Lopez, I.C. & Belhumeur, P.N. 2018. Citizen science and climate change: mapping the range expansions of native and exotic plants with the mobile app Leafsnap. *BioScience* 68: 348-358. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy019>
- Kross, S.M. & Nelson, X.J. 2011. A portable low-cost remote videography system for monitoring wildlife. *Methods Ecol. Evol.* 2: 191-196. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00064.x>
- Kumar, P., Sesham, V.M., Kumar, P., Mandaloju, S.P. & Keesara, S. 2016. A smartphone app for cephalometric analysis. *J. Clinical Orthodontics*. L(11): 694-699.
- Kurniawan, I.S., Tapilow, F.S. & Hidayat, T. 2017. Etho-morphology using smartphone apps to identify aves. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1157: 022088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/2/022088>
- Kwon, O. & Park, T. 2017. Applications of smartphone cameras in agriculture, environment, and food: a review. *J. Biosystems Eng.* 42(4): 330-338.
- Lane, N.D., Miluzzo, E., Lu, H., Peebles, D., Choudhury, T. & Campbell, A.T. 2010. A survey of mobile phone sensing. *IEEE Comm. Magazine* 2010: 140-150. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5560598>
- Levin, S., Krishnan, S., Rajkumar, S., Halery, N. & Balkunde, P. 2016. Monitoring of fluoride in water samples using a smartphone. *Sci. Total Environ.* 551: 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.156>
- Lia, X., Lia, J., Linga, J., Wang, C., Dinga, Y., Changa, Y., Wang, Y. & Caia, J. 2020. A smartphone-based bacteria sensor for rapid and portable identification of forensic saliva sample. *Sens. Actuators B Chem.* & 320: 128303. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128303>
- Liang, Y., Fan, H.-W., Fang, Z., Miao, L., Li, W., Zhang, X., Sun, W., Wang, K., He, L. & Chen, X. 2020. OralCam: enabling self-examination and awareness of oral health using a smartphone camera. Pp. 1-13. En: CHI '20: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Honolulu (25-30 abril). <https://doi.org/10.1145/3313831.3376238>
- Liu, J., Geng, Z., Fan, Z., Liu, J. & Chen, H. 2019. Point-of-care testing based on smartphone: the current state-of-the-art (2017-2018). *Biosens. Bioelectron.* 132: 17-37. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.01.068>
- Ludwig, S.K.J., Tokarski, C., Lang, S.N., van Ginkel, L.A., Zhu, H. & Ozcan, A. 2015. Calling biomarkers in milk using a protein microarray on your smartphone. *PLoS One* 10: e0134360. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134360>
- MacLeod, N., Benfield, M. & Culverhouse, P. 2010. Time to automate identification. *Nature* 467(9): 154-155. <https://doi.org/10.1038/467154a>
- Martinez, A.W., Phillips, S.T., Carrilho, E., Thomas III, S.W., Sindi, H. & Whitesides, G.M. 2008. Simple telemedicine for developing regions: camera phones and paper-based microfluidic devices for real-time, off-site diagnosis. *Anal. Chem.* 80: 3699-3707. <https://doi.org/10.1021/ac800112r>
- Martinez-Alpiste, I., Casaseca-de-la-Higuera, P., Alcaraz-Calero, J.M., Grecos, C. & Wang, Q. 2019. Smartphone-based object recognition with embedded machine learning intelligence for unmanned aerial vehicles. *J. Field Robotics* 2019: 1-17.
- Martínez-Pérez, B., de la Torre-Díez, I. & López-Coronado, M. 2013. Mobile health applications for the most prevalent conditions by the World health organization: review and analysis. *J. Med. Internet Res.* 15(2013): e120. <https://doi.org/10.2196/jmir.2600>
- Marzulli, M.I., Raunonen, P., Greco, R., Persia, M. & Tartarino, P. 2020. Estimating tree stem diameters and volume from smartphone photogrammetric point clouds. *Forestry*. 93: 411-429. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz067>
- McGonigle, A.J.S., Wilkes, T.C., Pering, T.D., Willmott, J.R., Cook, J.M., Mims III, F.M. & Parisi, A.V. 2018. Smartphone spectrometers. *Sensors* 18: 223. <https://doi.org/10.3390/s18010223>
- McKeon, S., Fenolio, D., Dreelin, R.A., Shaw, D., Kobrinsky, Z. & Meyer, C. 2020. NextGen natural history: New techniques for classical natural history questions. *J. Nat. Hist. Education and Experience* 14: 6-12.
- Mei, Q., Jing, H., Li, Y., Yisibashaer, W., Chen, J., Li, B.N. & Zhang Y. 2016. Smartphone based visual and quantitative assays on unconventional paper sensor. *Biosens. Bioelectron.* 75: 427-432. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2717845>
- Mei, B., Li, R., Cheng, W., Yu, J. & Cheng, X. 2017. Ultraviolet radiation measurement via smart devices. *IEEE Internet of Things J.* 4(4): 934-944. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2717845>
- Mendes, J., Pinho, T.M., dos Santos, F.N., Sousa, J.J., Peres, E., Boaventura-Cunha, J., Cunha, M. & Morais, R. 2020. Smartphone applications targeting precision agriculture practices—a systematic review. *Agronomy* 10: 855. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060855>
- Meredith, D.J., Clifton, D., Charlton, P., Brooks, J., Pugh, C.W. & Tarassenko, L. 2012. Photoplethysmographic derivation of respiratory rate: a review of relevant physiology. *J. Med. Eng. Technol.* 36(1): 1-7. <https://doi.org/10.3109/03091902.2011.638965>
- Merlin Bird ID. 2018. All About Birds Website. <http://merlin.allabout-birds.org/>. 20 de septiembre 2020.
- Miller, J., Morgenroth, J. & Gomez, C. 2015. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. *Urb. Forest. Urb. Greening* 14: 932-940. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.001>

- Montgomery, B.L., Shivas, M.A., Hall-Mendelin, S., Edwards, J., Hamilton, N.A., Jansen, C.C., McMahon, J.L., Warrilow, D. & van den Hurk, A.F. 2017. Rapid surveillance for vector presence (RSVP): development of a novel system for detecting *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *PLoS Neglected Trop. Diseases* 11(3): p.e0005505. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005505>
- Nasahara, K.N. & Nagai, S. 2015. Review: Development of an in situ observation network for terrestrial ecological remote sensing: the Phenological Eyes Network (PEN). *Ecol. Res.* 30: 211-223. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1239-x>
- Nijland, W., Bolton, D.K., Coops, N.C. & Stenhouse, G. 2016. Imaging phenology; scaling from camera plots to landscapes. *Remote Sens. Environ.* 177: 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.018>
- Nixon, M., Outlaw, F. & Leung, T.S.. 2020. Accurate device-independent colorimetric measurements using smartphones. *PLoS ONE* 15(3): e0230561. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230561>
- Nyaga, G.M. 2019. A mobile-based image recognition system for identifying bird species in Kenya. Tesis de Maestría. Facultad de Tecnología de la Información, Universidad Strathmore, Kenya.
- Özreçberöglü, N. & Kahramanoğlu, I. 2020. Mathematical models for the estimation of leaf chlorophyll content based on RGB colours of contact imaging with smartphones: A pomegranate example. *Folia Hort.* 32(1): 57-67. <https://doi.org/10.2478/fhort-2020-0006>
- Palmer, J.R., Oltra, A., Collantes, F., Delgado, J.A., Lucientes, J., Delacour, S., Bengoa, M., Eritja, R. & Bartumeus, F. 2017. Citizen science provides a reliable and scalable tool to track disease-carrying mosquitoes. *Nature Com.* 8(1): 916. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00914-9>
- Parisi, A.V., Downs, N., Igoe, D. & Turner, J. 2016. Characterisation of cloud cover with a smartphone camera. *Instrum. Sci. Technol.* 44: 23-34. <https://doi.org/10.1080/10739149.2015.1055577>
- Park, T.S., Li, W., McCracken, K.E. & Yoon, J.-Y. 2013. Smartphone quantifies Salmonella from paper microfluidics. *Lab. Chip* 13: 4832-4840. <https://doi.org/10.1039/c3lc50976a>
- Patel, S., Eluri, M., Boyers, L.N., Karimkhani, C. & Dellavalle, R. 2015. Update on mobile applications in dermatology. *Dermat. Online J.* 21(2): 1-6. <https://doi.org/10.5070/D3212023610>
- Patrício, D.I. & Rieder, R. 2018. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: a systematic review. *Comput. Electron. Agric.* 153: 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001>
- Patrignani, A. & Ochsner, T.E. 2015. Canopeo. A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agron. J.* 107: 2312-2320. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0150>
- Pennekamp, F. & Shtickzelle, N. 2013. Implementing image analysis in laboratory-based experimental systems for ecology and evolution: a hands-on guide. *Methods Ecol. Evol.* 4: 483-492. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12036>
- Pfaender, J., Gratton, L.M., Rosi, T., Malgieri, M. & Onorato, P. 2020. Spectral study of Na source with a smartphone and a diffraction grating. *Phys. Educ.* 55: 033005. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab7295>
- Pongnumkul, S., Chaovalit, P. & Surasvadi, N. 2015. Applications of smartphone-based sensors in agriculture: a systematic review of research. *J. Sensors* 2015: 1-18. <https://doi.org/10.1155/2015/195308>
- Potash, A.D., Greene, D.U., Foursa, G.A., Mathis, V.L., Conner, L.M. & McCleery, R.A. 2020. A comparison of animal color measurements using a commercially available digital color sensor and photograph analysis. *Current Zool.* 2020: 1-6. <https://doi.org/10.1093/cz/zoaa016>
- Prilianti, K.R., Yuwono, S.P., Adhiwibawa, M.A.S., Prihastyanti, M.N.P., Limantara, L. & Brotosudarmo, T.H.P. 2014. Automatic leaf color level determination for need based fertilizer using fuzzy logic on mobile application: A model for soybean leaves. Pp. 1-6. En: 2014 6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). <https://doi.org/10.1109/ICITEED.2014.7007895>
- Punitha, S., Logeshwari, P., Sivaranjani, P. & Priyanka, S. 2017. Detection of malarial parasite in blood using image processing. *KMUTNB.* 1(2): 211-213. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2942420>
- Rehman, T.U., Mahmud, M.S., Chang, Y.K., Jin, J. & Shin, J. 2019. Current and future applications of statistical machine learning algorithms for agricultural machine vision systems. *Comput. Electron. Agric.* 156: 585-605. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.006>
- Richardson, A.D., Braswell, B.H., Hollinger, D.Y., Jenkins, J.P. & Ollinger, S.V. 2009. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecol. Appl.* 19: 1417-1428. <https://doi.org/10.1890/08-2022.1>
- Rigon, J., Capuani, S., Fernandes, D. & Guimarães, T. 2016. A novel method for the estimation of soybean chlorophyll content using a smartphone and image analysis. *Photosynthetica* 54: 559-566. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0214-x>
- Rodrigues, M., Marques, M.B. & Carvalho, P.S. 2016. How to build a low cost spectrographs with tracker for teaching light spectra. *Phys. Educ.* 51: 014002. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/51/1/014002>
- Rong, Z., Wang, Q., Sun, N., Jia, X., Wang, K. & Xiao, R. 2019. Smartphone-based fluorescent lateral flow immunoassay platform for highly sensitive point-of-care detection of Zika virus nonstructural protein 1. *Anal. Chim. Acta* 1055(2019): 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.12.043>
- Rorie, R.L., Purcell, L.C., Karcher, D.E. & King, C.A. 2011. The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images. *Crop Sci.* 51: 2174-2180. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.12.0699>
- Schrader, J., Pillar, G. & Kreft, H. 2017. Leaf-IT: An Android application for measuring leaf area. *Ecol. Evol.* 7: 9731-9738. <https://doi.org/10.1002/ece3.3485>
- Shahvar, A., Shamsaei, D. & Saraji, M. 2020. A portable smartphone-based colorimetric sensor for rapid determination of water content in ethanol. *Measurement* 150(2020): 107068. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107068>
- Siddiqui M.F., Kim, S., Jeon, H., Kim, T., Joo, C. & Park, S. 2018. Miniaturized sample preparation and rapid detection of arsenite in contaminated soil using a smartphone. *Sensors* 18: 777. <https://doi.org/10.3390/s18030777>
- Skandarajah, A., Sunny, S.P., Gurpur, P., Reber, C.D., D'Ambrosio, M.V., Raghavan, N. & Birur, P. 2017. Mobile microscopy as a screening tool for oral cancer in India: A pilot study. *PLoS ONE.* 12(11): 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188440>
- Snik, F., Jeroen, H.H. Rietjens, Apituley, A., Volten, H., Mijling, B., Di Noia, A., Heikamp, S., Heinsbroek, R.C., Hasekamp, O.P., Smit, J.M., Vonk, J., Stam, D.M., van Harten, G., de Boer, J. & Keller, C.U. 2014. Mapping atmospheric aerosols with a citizen science network of smartphone spectropolarimeters. *Geophys. Res. Lett.* 41: 7351-7358. <https://doi.org/10.1002/2014GL061462>

- Sonnentag, O., Hufkens, K., Teshera-Sterne, C., Young, A.M., Friedl, M., Braswell, B.H., Milliman, T., O'Keefe, J. & Richardson, A.D. 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 152: 159-177. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.009>
- Song, W., Jiang, N., Wang, H. & Vincent, J. 2019. Use of smartphone videos and pattern recognition for food authentication. *Sens. Actuators B Chem.* 304: 127247. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127247>
- Staggemeier, V.G., Camargo, M.G.G., Diniz-Filho, J.A.F., Freckleton, R., Jardim, L., & Morellato, L.P.C. 2020. The circular nature of recurrent life cycle events: a test comparing tropical and temperate phenology. *J. Ecol.* 108(2): 393-404. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13266>
- Statista, 2020. <https://www.statista.com>. 10 de septiembre 2020.
- Steen, R. 2017. Bird monitoring using the smartphone (iOS) application Videography for motion detection. *Bird Study* 64(1): 62-69. <https://doi.org/10.1080/00063657.2016.1271772>
- Stevens, M., Párraga, C.A., Cuthill, I.C., Partridge, J.C. & Troscianko, T.S. 2007. Using digital photography to study animal coloration. *Biol. J. Linn. Soc.* 90: 211-237. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2007.00725.x>
- Sumriddetchkajorn, S., Chaitavon, K. & Intaravanne, Y. 2014. Mobile-phone based colorimeter for monitoring chlorine concentrations in water. *Sens. Actuators B Chem.* 191: 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.10.024>
- Suo, X., Liu, Z., Sun, L., Wang, J. & Zhao, Y. 2017. Aphid identification and counting based on smartphone and machine vision. *J. Sens.* 2017: 1-7. <https://doi.org/10.1155/2017/3964376>
- Tang, J., Körner, C., Muraoka, H., Piao, S., Shen, M., Thackeray, S.J. & Yang, X. 2016. Emerging opportunities and challenges in phenology: a review. *Ecosphere* 7(8): e01436. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1436>
- Tao, M., Ma, X., Huang, X., Liu, C., Deng R., Liang K & Qi, L. 2020. Smartphone-based detection of leaf color levels in rice plants. *Comp. Elect. Agric.* 173(2020): 105431. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105431>
- Teacher, A.G.F., Griffiths, D.J., Hodgson, D.J. & Inger, R. 2013. Smartphones in ecology and evolution: a guide for the app-rehensive. *Ecol. Evol.* 3(16): 5268-5278. <https://doi.org/10.1002/ece3.888>
- The Telegraph*. 2018. The evolution of the mobile phone, from the Motorola DynaTAC to the Samsung Galaxy S9. 12 de agosto 2020.
- Theuwissen, A. 2008. CMOS image sensors: State-of-the-art. *Solid-State Electronics* 52: 1401-1406. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.04.012>
- Thomas, R.L. & Fellowes, M.D.E. 2016. Effectiveness of mobile apps in teaching field-based identification skills. *J. Biol. Educ.* 9266: 1-8.
- Troscianko, J. & Stevens, M. 2015. Image calibration and analysis toolbox: a free software suite for objectively measuring reflectance, colour and pattern. *Methods Ecol. Evol.* 6: 1320-1331. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12439>
- Turner, J., Igoe, D., Parisi, A.V., McGonigle, A.J., Amar, A. & Wainwright, L. 2019. A review on the ability of smartphones to detect ultraviolet (UV) radiation and their potential to be used in UV research and for public education purposes. *Sci. Total Env.* 706: 135873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135873>
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K. & Pleijel, H. 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynth. Res.* 91: 37-46. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5>
- Van Horn, G., MacAodha, O., Song, Y., Cui, Y., Sun, C., Shepard, A., Adam, H., Perona, P. & Belongie, S. 2018. Pp. 8769-8778. The iNaturalist species classification and detection dataset. En: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00914>
- Vashist, S.K., van Oordt, T., Schneider, E.M., Zengerle, R., von Stetten, F. & Luong, J.H.T. 2015. A smartphone-based colorimeter reader for bioanalytical applications using the screen-based bottom illumination provided by gadgets. *Biosens. Bioelectron.* 67: 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.08.027>
- Vesali, F., Omid, M., Kaleita, A. & Mobli, H. 2015. Development of an android app to estimate chlorophyll content of corn leaves based on contact imaging. *Comp. Electr. Agric.* 116: 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.012>
- Vollmann, J., Walter, H., Sato, T. & Schweiger, P. 2011. Digital image analysis and chlorophyll metering for phenotyping the effects of nodulation in soybean. *Comput. Electron. Agric.* 75: 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.11.003>
- Von Wettstein, D. 1957. Chlorophyll-letale und der submikroskopische formwechsel der plastiden. *Exp. Cell. Res.* 12: 427-506. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(57\)90165-9](https://doi.org/10.1016/0014-4827(57)90165-9)
- Vrielinga, A., Meroni, B., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Wang, T., Zurita-Milla, R., Oosterbeek, K., O'Connor, B. & Paganini, M. 2018. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sens. Envir.* 215: 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>
- Walther, D. & Kampen, H. 2017. The citizen science project 'Mueckenatlas' helps monitor the distribution and spread of invasive mosquito species in Germany. *J. Med. Entom.* 54(6): 1790-1794. <https://doi.org/10.1093/jme/tjx166>
- Wang, L.-J., Chang, Y.-C., Ge, X., Osmanson, A.T., Du, D., Lin, Y. & Lei, L. 2016. Smartphone optisensing platform using a DVD grating to detect neurotoxins. *ACS Sens.* 1: 366-373. <https://doi.org/10.1021/acssensors.5b00204>
- Wang, Z., Koirala, A., Wals, K., Anderson, A. & Verma, B. 2018. In field fruit sizing using a smartphone application. *Sensors* 18: 3331. <https://doi.org/10.3390/s18103331>
- Wei, Q., Nagi, R., Sadeghi, K., Feng, S., Yan, E., Jung, K.S., Caire, R., Tseng, D. & Ozcan, A. 2014. Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smartphone. *ACS Nano* 8: 1121-1129. <https://doi.org/10.1021/nn406571t>
- Wess, T. 2017. Smartphone citizen science: can a conservation hypothesis be tested using non specialist technology? *Heritage Sci.* 5: 35. <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0148-z>
- Wicks, L.C., Cairns, G.S., Melnyk, J., Bryce, S., Duncan, R.R. & Dalgarno, P.A. 2018. EnLightenment: High resolution smartphone microscopy as an educational and public engagement platform. *Welcome Open Res.* 2: 107. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.12841.2>
- Wiechmann, W., Kwan, D., Bokarius, A. & Toohey, S.L. 2016. There's an app for that? Highlighting the difficulty in finding clinically relevant smartphone applications. *West. J. Emerg. Med.* 17: 191-194. <https://doi.org/10.5811/westjem.2015.12.28781>

Witt, C., Pasuquim, J.M.C.A., Mutters, R. & Buresh, R.J. 2005. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. *Better Crop* 89: 36-39.

Wu, H.P., Li, P., Wang, Y., He, Y.W. & Li, C. 2010. Measurement for opto-electronic conversion functions (OECFs) of digital still-picture camera. En: Proceedings SPIE 7850, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology, Beijing (18-20 octubre), Volumen 7850. <https://doi.org/10.1117/12.869364>

Xu, M., Liu, R., Chen, J.M., Liu, Y., Shang, R., Ju, W., Wu, C. & Huang, W. 2019. Retrieving leaf chlorophyll content using a matrix-based vegetation index combination approach. *Remote Sens. Environ.* 224: 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.039>

Yang, X., Sun, M., Wang, T., Wong, M.W. & Huang, D. 2018. A smartphone based portable analytical system for on-site quantification of hypochlorite and its scavenging capacity of antioxidants. *Sens. Actuators B Chem.* 283: 524-531. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.131>

Yang, X., Wang, Y., Liu, W., Zhang, Y., Zheng, F., Wang, S., Zhang, D. & Wang, J. 2016. A portable system for on-site quantification of formaldehyde in air based on G-quadruplex halves coupled with a smartphone reader. *Biosens. Bioelectron.* 75: 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.08.020>

Zhang, D. & Liu, Q. 2016. Biosensors and bioelectronics on smartphone for portable biochemical detection. *Biosens. Bioelectron.* 75: 273-284. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.08.037>

Zheng, H., Cheng, T., Li, D., Yao, X., Tian, Y., Cao, W. & Zhu, Y. 2018. Combining unmanned aerial vehicle (UAV)-based multispectral imagery and ground-based hyperspectral data for plant nitrogen concentration estimation in rice. *Front. Plant Sci.* 9: 936. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00936>