

App-ExploraCítricos, a digital development for integrate pest surveillance in citrus crops

App-ExploraCítricos, un desarrollo digital para la vigilancia integral de plagas citrícolas

Gustavo Mora-Aguilera*, Gerardo Acevedo-Sánchez, Oscar Eder Flores-Colorado, Juan José Coria-Contreras, Eduardo Guzmán-Hernández, ¹Colegio de Posgraduados - Laboratorio de Análisis de Riesgo Epidemiológico Fitosanitario (CP-LANREF). Texcoco, Estado de México. CP 56230; Pedro Robles-García, SENASICA DGSV. Insurgentes Sur No. 489, Col. Hipódromo, C.P. 06100, Ciudad de México.

* Corresponding author: morag@colpos.mx

Received: September 30, 2022.

Accepted: December 05, 2022.

Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Flores-Colorado OE, Coria-Contreras JJ, Guzmán-Hernández E and Robles-García P. 2023. App-ExploraCítricos, a digital development for integrate pest surveillance in citrus crops. Mexican Journal of Phytopathology 41(1).

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2209-5>

First DOI publication: December 31, 2022.

Primera publicación DOI: 31 de Diciembre, 2022.

Abstract. App-ExploraCítricos v2.0 is an application for measuring epidemiological variables with a spatio-temporal, multi-crop, multispecies-variety, multivariate, multi-pest, multiuser, and multicriteria approach for risk analysis in the citrus production chain. The objective of this work was to develop, and field validate an application for mobile devices with Android® 6.0 or higher, which would allow *n*-assessments *in situ* associated with a regional epidemiological process through a flexible

Resumen. App-ExploraCítricos v2.0 es una aplicación para medición de variables epidemiológicas con enfoque espacio-temporal, multicultivo, multiespecie-variedad, multivariable, multiplaga, multiusuario y multicriterio para análisis de riesgos en la cadena citrícola. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y validar en campo una aplicación para dispositivos móviles Android® superior a 6.0, que permitiera realizar *n*-evaluaciones *in situ* asociadas a un proceso epidemiológico regional mediante un diseño flexible personalizado a un objetivo sanitario. El proceso inicia ingresando claves de acceso para autenticación de usuario. Antes de una evaluación el usuario debe configurar las *n*-plagas y/o *n*-enfermedades de interés asociadas al cultivo(s)/especie(s) citrícolas incluyendo el nombre común y científico, y tipo de organismo (hongo, virus, bacteria, etc.). La configuración se almacena localmente para posterior aplicación a un proceso evaluativo. Posteriormente se configuran *n*-escalas con *n*-clases independientes, cualitativas o cuantitativas, para evaluar ocurrencia, severidad,

design customized to a sanitary objective. The process begins by entering access codes for user authentication. Before an assessment, the user must configure the *n*-pests and/or *n*-diseases of interest associated with the citrus crop(s)/species(s), including the common and scientific name, and type of organism (fungus, virus, bacterium, etc.). The settings are stored locally for the further assessment process. Subsequently, *n*-scales with *n*-independent, qualitative or quantitative classes are configured to assess occurrence, severity, or infestation per organism. In addition, the presence/absence or vector infestation level can be assessed. Once the assessment criteria have been customized for a regional scenario, sampling begins in *n*-plantations with individual characterization using 26-epidemiological-productive variables, e.g., agronomic condition, age, crop, cultivar, irrigation type, nutrition, management, etc. The assessment is performed in *n*-plants per plantation. Per plant, the *n*-pests and/or *n*-diseases previously configured are assessed with the respective scales. The user may take up to three georeferenced photographs of pest infestation or symptoms for eventual further sampling for etiological purposes. The assessment(s) is virtually submitted to a web database, exported, or shared via email, Bluetooth, social media, or other device tools. The App was successfully validated on citrus crops of San Luis Potosí, Veracruz, and Chiapas states for CTV, CLas, CiLV, and their respective vectors with a total of 58 plantations and 37700 metadata generated. The App-ExploraCítricos v2.0 is a phytosanitary innovation that may contribute to the integration of large volumes of relevant, standardized, and quality data for risk analysis and management in citrus farming.

Keywords: App-Mobil, HLB, CTV, Leprosis, Epidemiology system, Epidemic risk

o infestación por cada organismo. Adicionalmente se puede evaluar presencia/ausencia o nivel de infestación de un vector de patógeno. Una vez personalizado los criterios de evaluación para un entorno regional, se inicia el muestreo en *n*-plantaciones con la caracterización de cada plantación mediante 26-variables epidemiológico-productivas, p.e., condición agronómica, edad, cultivo, cultivar, tipo de riego, nutrición, manejo, etc. La evaluación se realiza en *n*-plantas por plantación. Por planta, se evalúan con las respectivas escalas las *n*-plagas y/o *n*-enfermedades previamente configuradas. Opcionalmente, el usuario puede tomar hasta tres fotografías georreferenciadas de infestaciones o síntomas para posterior toma de muestras con fines etiológicos. Los datos de una evaluación(es) se envía virtualmente a una base de datos web, se exporta o se comparte desde mail, bluetooth, redes sociales u otras herramientas del dispositivo. La App fue exitosamente validada en los estados de San Luis Potosí, Veracruz, y Chiapas para CTV, CLas, CiLV, y sus respectivos vectores en un total de 58 plantaciones con 37700 metadatos generados. La App-ExploraCítricos v2.0 una innovación fitosanitaria que puede contribuir a la integración de grandes volúmenes de datos pertinentes, estandarizados y de calidad para análisis y gestión de riesgos en la citricultura.

Palabras clave: App-móvil, HLB, CTV, Leprosis, sistema epidemiológico, riesgo epidémico.

A partir del ingreso de *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), bacteria causal del HLB o Huanglongbing, a regiones citrícolas mexicanas en 2009, se fortalecieron estrategias oficiales ante riesgos fitosanitarios de potencial impacto económico. Entre éstos, se concibió el *Plan de Emergencia contra el HLB* para la contención y mitigación nacional

Since *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), the bacterium that causes the HLB or Huanglongbing, was detected in Mexican citrus-growing regions in 2009, government strategies were strengthened in response to phytosanitary risks with potential economic impact. Among these, the *Emergency Plan against HLB* was conceived for the national containment and mitigation of risks associated with the citrus HLB (Mora-Aguilera *et al.*, 2014a); an *Evaluation of the economic impact of Huanglongbing (HLB) in the Mexican Citrus Production Chain* was conducted for contributing to the definition of phytosanitary policies (Salcedo *et al.*, 2010); a national program to establish *Area Wide Disease Control (ARCOs)*, currently referred to as *Epidemiological Phytosanitary Management Areas (AMEFIs)*, to manage the spread of HLB through the *Diaphorina citri* control, the insect vector of CLas; a *Surveillance System* focused on monitoring at-risk pests not present in Mexico, among other national projects promoted by SENASICA-DGSV. Although these strategies have mitigated productive impacts and generated wide technical diffusion among the productive chain, the need to strengthen a comprehensive model of *prevention*, management, and effective communication of phytosanitary risks still prevails. Epidemic citrus risk scenarios have increased throughout the country from 2009 to the present. Thus, the HLB is present in 387 of the 645 citrus-growing counties in 26 Mexican states (SIAP, 2022); the ‘spread’ and ‘establishment’ of the *Citrus leprosis virus* (CiLV), responsible for Citrus Leprosis, present in 18 states and more than 140 citrus-growing has been recognized; likewise, the re-emergence of *Citrus tristeza virus* with more aggressive variants has been demonstrated in regions of the Mexican Gulf. An outbreak of *Xanthomonas citri*, the causal agent of citrus canker, was detected in the north of the country, which involved monitoring and tree

de riesgos asociados con el HLB de los cítricos (Mora-Aguilera *et al.*, 2014a); se realizó una *Evaluación del impacto económico del Huanglongbing (HLB) en la Cadena Citrícola Mexicana* con el fin de coadyuvar a la definición de políticas fitosanitarias (Salcedo *et al.*, 2010); un proyecto nacional para establecer *Áreas Regionales de Control (ARCOs)*, actualmente referidas como *Áreas de Manejo Epidemiológico Fitosanitario (AMEFIs)*, con el fin de manejar la dispersión del HLB mediante control de *Diaphorina citri*, insecto vector de CLas; un *Sistema de Vigilancia* enfocado al monitoreo de plagas de riesgo no presentes en México, entre otros proyectos nacionales impulsados por SENASICA-DGSV. Aunque estas estrategias han mitigado impactos productivos y generado amplia difusión técnica entre actores de la cadena productiva, prevalece la demanda de fortalecer un modelo integral de *prevención*, manejo y comunicación efectiva de riesgos fitosanitarios. De 2009 al presente, los escenarios de riesgos epidémicos cítricos se han incrementado en el territorio nacional. Así, el HLB está presente en 387 de los 645 municipios cítricos de 26 entidades federativas de México (SIAP, 2022); se ha reconocido la ‘dispersión’ y ‘establecimiento’ del *Citrus leprosis virus* (CiLV), responsable de la Leprosis de los cítricos, el cual está presente en 18 estados y más de 140 municipios cítricos; así mismo, se ha demostrado la reemergencia del *Citrus tristeza virus* con variantes más agresivas en regiones del golfo mexicano. En el norte del país se detectó un brote de *Xanthomonas citri*, causal del Cancro de los cítricos, lo cual implicó acciones de monitoreo y eliminación de árboles lográndose erradicación del patógeno. Este evento, y el brote de *Ceratitidis capitata* en Colima, constituyen casos mexicanos recientes del éxito de erradicación y demuestran la importancia de programas fitosanitarios preventivos robustos y dinámicos. México, a través del SENASICA, es uno de los países americanos

removal measures and resulted in the eradication of the pathogen. This event, and the outbreaks of *Ceratitis capitata* in Colima, are recent Mexican cases of successful eradication and prove the need for strong and dynamic preventive phytosanitary programs. Through SENASICA, Mexico is amongst the American countries with the highest investment in phytosanitary policies that effect inspection infrastructure, diagnostic, and operation, human resources consolidation, and support programs for the movement and agricultural products trade within the framework of the powers and responsibilities of the Federal Plant Health Law (<https://acortar.link/oLCu0l>). However, scientific research and cutting-edge technological developments in support of official surveillance systems are scarce and oriented toward phytosanitary problems with high risk or social impact (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). In addition, among the different National Plant Protection Organizations (ONPF), there is still a prevailing vision of articulating campaigns aimed at a particular pest, implying independent operation and consequently a strong economic, human and productive inefficiency. However, a gradual adoption of more integrated strategies can be perceived in some production chains. Thus, for example, in citrus, the AMEFIs are aimed at regional epidemiological and phytosanitary management of CTV, CLas, CiLV, their vectors, and secondary pests (e.g., *Aleurocanthus* sp. / citrus blackfly) (<https://acortar.link/oLCu0l>). Implicitly, these new approaches recognize the importance of creating *holistic-systemic* phytosanitary systems for optimizing integrated pest management. This vision is feasible and cannot be postponed due to the current digital revolution and technological availability, which allows processing massive data volumes for automatic and harmonized decision-making on a regional scale (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). Against this background, this work aimed

con mayor inversión en políticas fitosanitarias que impactan en infraestructura de inspección, diagnóstico y operación, consolidación de recursos humanos, y programas de soporte para la movilización y comercialización de productos agrícolas en el marco de las atribuciones y responsabilidades de la Ley Federal de Sanidad Vegetal (<https://acortar.link/oLCu0l>). Sin embargo, proyectos de investigación científica y desarrollos tecnológicos de vanguardia en apoyo a los sistemas oficiales de vigilancia han sido escasos y se han orientado a problemas fitosanitarios de alto riesgo o impacto social (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). Adicionalmente, entre los distintos Organismos Nacionales de Protección Fitosanitaria (ONPF) aún prevalece la visión de articular Campañas orientadas a una plaga en particular, lo cual implica operatividad independiente y por consiguiente fuerte ineficiencia económica, humana y productiva. Se percibe, sin embargo, una gradual adopción de estrategias más integrales en algunas cadenas productivas. Así por ejemplo, en cítricos, las AMEFIs tienen como propósito el manejo epidemiológico fitosanitario regional del CTV, CLas, CiLV, sus respectivos vectores, y plagas secundarias (p.e., *Aleurocanthus* sp. / mosca prieta) (<https://acortar.link/oLCu0l>). Estos nuevos enfoques reconocen implícitamente la importancia de generar sistemas fitosanitarios *holístico-sistémicos* que optimicen la gestión integral de plagas. Una visión factible e impostergable en el contexto de la revolución digital actual y la accesibilidad tecnológica, lo cual permite manejar grandes volúmenes de datos para toma de decisiones automáticas y armonizadas a escala regional (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo demostrar el marco conceptual, estructural y operativo de un desarrollo tecnológico digital en plataforma Android como prototipo de un instrumento de vigilancia y gestión integral de plagas de cítricos para oficiales y técnicos

to demonstrate the conceptual, structural, and operational framework of a technological digital development on Android platform as prototype of a tool for surveillance and comprehensive management of citrus pests aimed at ONPF officers and technicians responsible for implementing surveillance - *prevention* - protection coordinated actions against phytosanitary risks. The extrapolation of the conception to any operational and productive environment is also discussed.

MATERIALS AND METHODS

Conception. The conception of the mobile-app devices for Android® platform was defined as App-ExploraCítricos v2.0. Epidemiological management and decision making were objectives for the conception supporting a conceptual digital model denominated Comprehensive Phytosanitary Citrus System (SIFICIT) for use in official programs. This model is based on the digital management of phytosanitary information provided through multiple users for decision-making in quasi real-time (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). The premise of these objectives was that all information collected with the App should be integrated into an *ad hoc* operating system (Figure 1), which can also integrate historical databases (e.g., weather) from other sources. These computerized surveillance and risk management systems in productive chains such as coffee, agave, and citrus have a conception and structure specific to the phytosanitary needs of each one, and have the *Epidemiological System* as a rational framework, which gives them a *holistic-systemic* vision and focuses on the plant (crop) as the integrating health axis (Mora-Aguilera *et al.*, 2021, Mora-Aguilera *et al.*, 2014b; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017).

de ONPF responsables de ejecutar acciones coordinadas de vigilancia - *prevención* - protección ante riesgos fitosanitarios. Se discutirá también la extrapolación de la concepción a cualquier entorno operativo y productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Concepción. La concepción de la aplicación para dispositivos móviles con plataforma Android® fue denominada App-ExploraCítricos v2.0. Tuvo como objetivos la gestión epidemiológica y toma de decisiones en soporte a un modelo digital conceptual denominado Sistema Integral Fitosanitario de los Cítricos (SIFICIT) para uso en programas oficiales. Este modelo tiene como base la gestión digital de información fitosanitaria alimentada por múltiples usuarios para toma de decisiones en tiempo *cua-si* real (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). Estos objetivos tuvieron como premisa que toda información obtenida con la App debe integrarse a un sistema operativo *ad hoc* (Figura 1), la cual a su vez puede integrar bases de datos históricas (p.e., clima) de otras fuentes. Estos sistemas computarizados de vigilancia y manejo de riesgos en cadenas productivas como el cafeto, agave y cítricos tienen una concepción y estructura específica a las necesidades fitosanitarias de cada cadena productiva y tienen como marco racional obligado el *Sistema epidemiológico* lo cual les confiere una visión *holística-sistémica* y centra a la planta (cultivo) como el eje integrador de sanidad (Mora-Aguilera *et al.*, 2021, Mora-Aguilera *et al.*, 2014b; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017).

Flujo de proceso en el enfoque de programación. El flujo implicado en el funcionamiento de App-ExploraCítricos v2.0 se generó con base en actividades directas convencionales de muestreo y

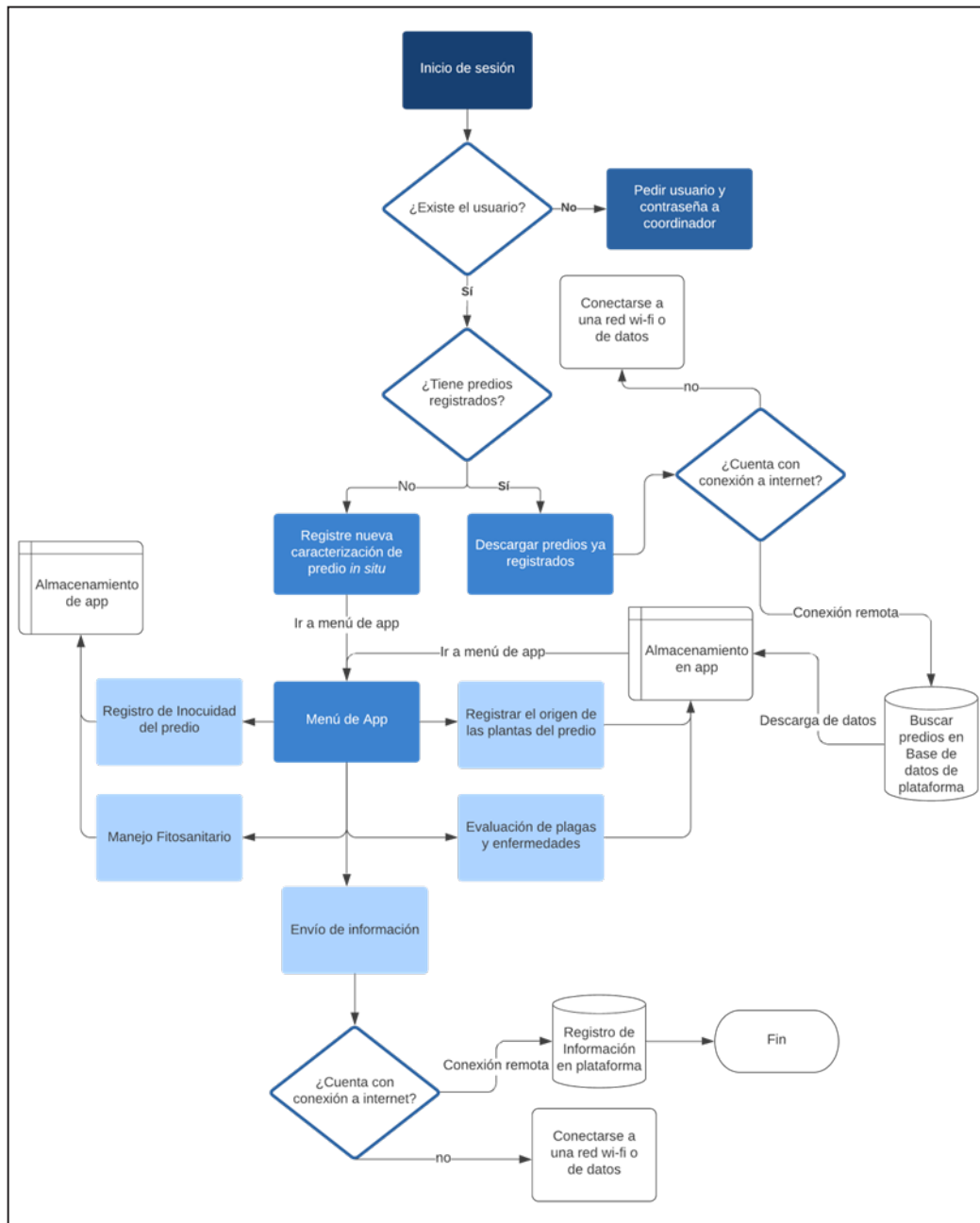


Figure 1. Structural conception flowchart involved during the digital programing of App-ExploraCítricos v2.0 for mobile devices with Android® operating system.

Figura 1. Diagrama de flujo de la concepción estructural implicada durante el desarrollo digital App-ExploraCítricos v2.0 para dispositivos móviles con sistema operativo Android®.

Process flow in the programming approach.

The flow involved in the operation of App-ExploraCitricos v2.0 was based on conventional direct sampling and monitoring activities in the crop field. The digital processes and modules interrelation that record activities and crop field observations directly in the mobile-app were integrated into the Android programming (Figure 1). Likewise, conditional procedures and programmatic, operational and technical exceptions that could be encountered in the evaluation for new or historical sites were considered.

Database structure and relational tables. A MySQL® database was developed for information storage generated in App-ExploraCitricos v2.0 mobile device. The internal database structure and relationship implied modular tables or blocks programming of information related to key-variable, primarily determined by a farm site-tracking ID. The variables were segmented into modules that mainly involved planting characterization, on-site assessment, and processing for running information reports, visualization of sampling data associated with plant-by-plant information, or complete summaries of assessments (Figure 2).

Software, programming language, and validation. App-ExploraCitricos v2.0 was programmed with free-use tools, open source programming languages, and dedicated servers for metadata storage using Linux/Apache technologies for web settings. Programs such as MySQL/MariaDB and other complementary ones were used as database managers; PHP / Nodejs, JavaScript, Ajax, HTML5, and CSS were used for the back-end and front-end layout. The mobile-app was developed for Android® articulating to web technologies and programming languages associated with the server (PHP, HTML, CSS, etc.)

monitoreo en campo. En la programación Android, se integraron procesos digitales vinculantes e interrelación de módulos que registran actividades y observaciones de campo directamente en la aplicación móvil (Figura 1). Así mismo, se consideraron procedimientos condicionantes y excepciones programáticas, operativas y técnicas que puedan suceder dependiendo de la evaluación de predios nuevos o históricos.

Estructura de bases de datos y tablas relacionales. Se construyó una base de datos MySQL® para almacenamiento de la información generada en App-ExploraCítricos v2.0 en el dispositivo móvil. La estructura y relación de la base de datos interna implicó el desarrollo de tablas o bloques de información modular vinculantes a través de variables clave o 'key-variables', principalmente determinadas por un ID de seguimiento de predios. Las variables fueron segmentadas en módulos que implicaron principalmente caracterización de plantaciones, evaluación en sitios y procesamiento para ejecución de resúmenes de información, visualización de datos de muestreos vinculantes con información planta por planta o resúmenes integrales de las evaluaciones (Figura 2).

Software, lenguaje de programación y validación. El desarrollo y programación de App-ExploraCítricos v2.0 se basó en lenguajes de programación y herramientas de uso libre y servidores dedicados para almacenamiento de metadatos configurados con tecnologías Linux/Apache. Se emplearon programas como MySQL/MariaDB y otros complementarios como gestores de bases de datos; PHP / Nodejs, y JavaScript, Ajax, HTML5 y CSS para el maquetado base 'back-end' y 'front-end'. La aplicación móvil se desarrolló para Android® articulada a tecnologías web y lenguajes de programación asociadas al servidor (PHP, HTML, CSS,

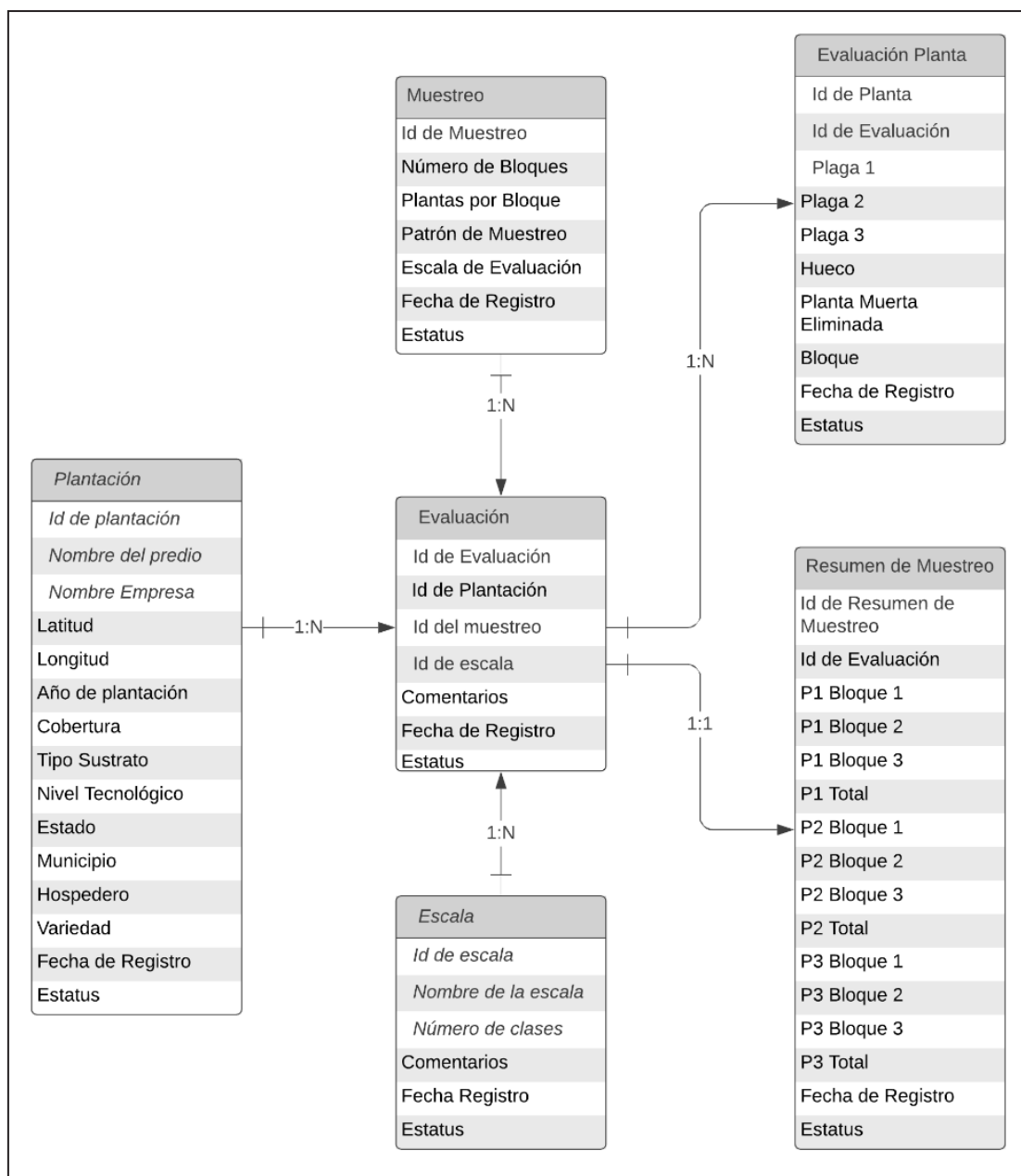


Figure 2. App-ExploraCitricos v2.0 database entity-relationship model designed for crop field dynamic assessment processes, up to real-time reports on mobile device.

Figura 2. Modelo entidad-relación de base de datos de App-ExploraCítricos v2.0 construido para procesos dinámicos de evaluación en campo, hasta la generación de reportes de resultados en tiempo real en el dispositivo móvil.

to generate web services for recording-sending data from the crop field using Wi-Fi or mobile plan. MySQL relational databases and tables were used. Lab validations were performed to ensure suitability for compatibility between mobile systems, automatic verification of geo-localization, record recovery, local data historicity, and supporting. In the crop field, simultaneous validations were performed by 2-5 users in Veracruz, SLP, and Chiapas commercial citrus plantations.

RESULTS

The final structure of App-ExploraCitricos v2.0 was developed through an interactive-continuous process of crop field validations. The mobile-app configuration is dynamic and aimed to the objective(s) of the user. The process integrated the measurement of epidemiological variables with a spatio-temporal, multicrop, multivariety-species, multivariate, multipest, multiuser and multicriteria approach through sampling and/or monitoring, imagery record about the pests and damage of concern for epidemic traceability in the crop field. The purpose was to provide a comprehensive risk analysis of the productive chain in regional environments. The mobile-app was linked to dynamic databases with a local connection on mobile devices and web environment (Figure 3A). The app was designed under a conceptualization of epidemiological parameterization with 26 variables of the *Epidemiological System* (Figure 3B), customizable by user according to the objective of epidemiological assessment (Figure 3C). The App was developed for Android® devices with versions higher than 6.0 Marshmallow. The crop field validation allowed the assessment of phytosanitary pests in several assessed citrus species. Likewise, the user can add *n*-pests of concern for a region or an exploration purposes, in specific categories

etc.) para generar servicios web de registro-envío de datos desde campo mediante wifi o datos móviles. Se emplearon bases de datos y tablas relacionales con MySQL principalmente. Se realizaron validaciones en laboratorio para asegurar la adecuación por compatibilidad entre sistemas móviles, verificación geográfica automática de georreferencias, recuperación de registros, historicidad local datos, e información de soporte. En campo, se realizaron validaciones simultáneas por 2-5 usuarios en 58 plantaciones comerciales de cítricos en Veracruz, SLP y Chiapas.

RESULTADOS

La estructura final de App-ExploraCítricos v2.0 se desarrolló interactivamente a través de un proceso continuo de validaciones en 58 plantaciones cítricas y la generación de 37700 metadatos. Su configuración es dinámica y orientada al objetivo(s) del usuario. Integró la medición de variables epidemiológicas con enfoque espacio-temporal, multicultivo, multivariedad-especie, multivariable, multiplaga, multiusuario y multicriterio a través de muestreos y/o monitoreos, registro fotográfico de plagas y/o daños de interés para trazabilidad del proceso epidemiológico en campo o fines etiológicos. Esta información tuvo como fin el análisis integral de riesgos de la cadena productiva en entornos regionales. La aplicación móvil se articuló a bases de datos dinámicas con conexión local en dispositivos móviles y en un entorno web (Figura 3A). Se diseñó bajo una conceptualización de parametrización epidemiológica con 26 variables del Sistema Epidemiológico (Figura 3B) y configurable por el usuario en función del objetivo de la exploración epidemiológica (Figura 3C). La App se desarrolló para dispositivos Android® con versiones superiores a 6.0 Marshmallow. Su validación en campo permitió la exploración de problemas

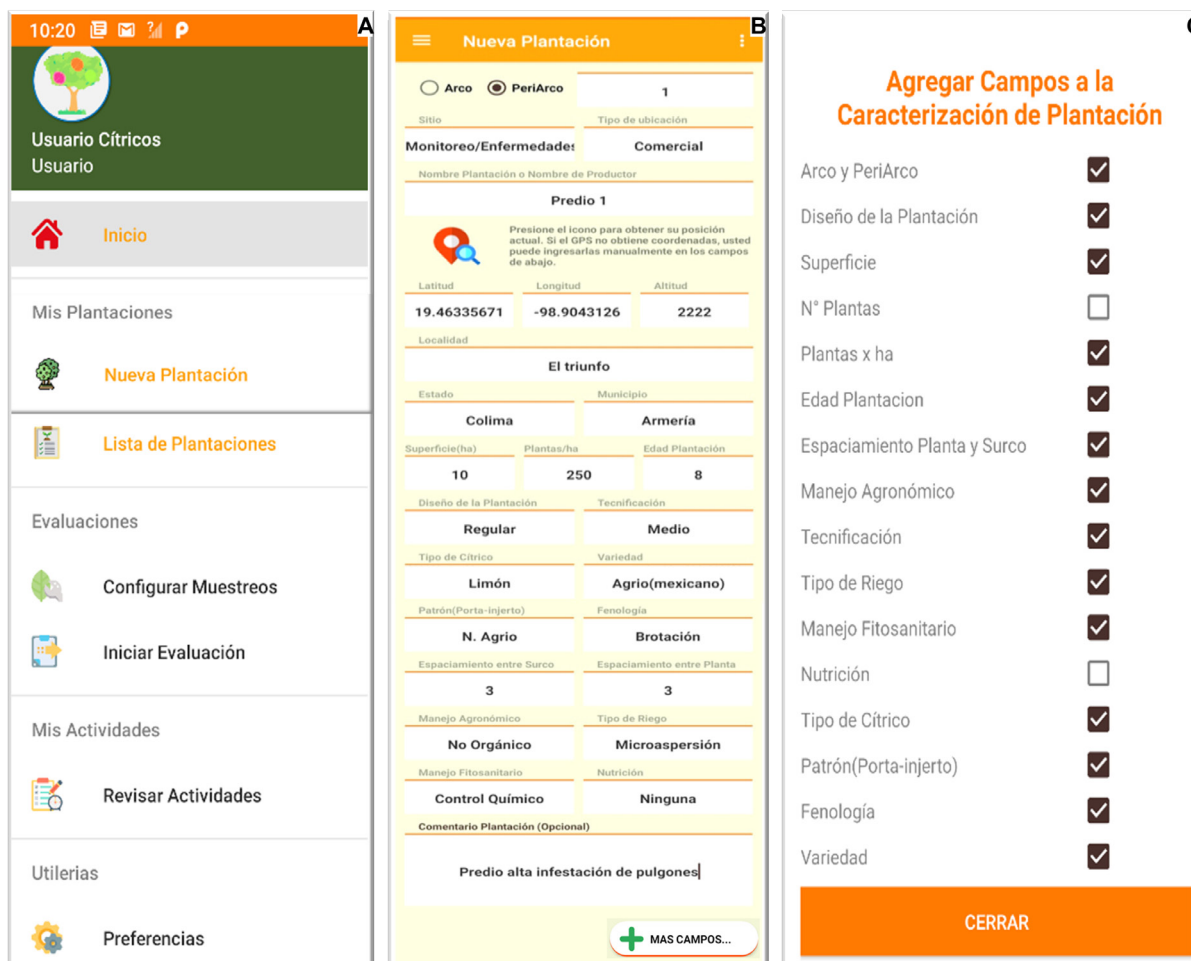


Figure 3. Interface example of App-ExploraCítricos v2.0 for sampling and/or monitoring of citrus pests and diseases. A. Initial view ('home') with modules menu. B. Plantations characterization module through 26 agronomic-epidemiological variables. C. Module for configuration of variables selected to integrate the assessment menu according to an official work plan.

Figura 3. Ejemplos de interfases de la App-ExploraCítricos v2.0 para muestreo y/o monitoreo de plagas y enfermedades de cítricos. A. Vista inicial ('home') con menú de módulos. B. Módulo de caracterización de plantaciones mediante 26 variables agronómico-epidemiológicas. C. Módulo de configuración de variables a seleccionar para integrar el menú de evaluaciones acorde a un plan o programa de trabajo.

such as insect-pest or insect-vector, and n -diseases associated with pathogens. In order to use the app, authentication keys are required for login according to a user role (e.g., Technician, Coordinator, Analyst, etc.). The access keys are generated in a web Platform. The design of the app for the official ONPF sector allows synchronized or non-synchronized *in-situ* activities to be carried out in

fitosanitarios en diversas especies cítricas evaluadas. Asimismo, el usuario puede incluir n -plagas de interés para una región o al propósito exploratorio, en categorías específicas como insecto-plaga o insecto-vector, y n -enfermedades asociadas con el organismo patógeno. El uso es privado, por lo cual requiere claves de autenticación para su ingreso según un rol de usuario (p.e., Técnico, Coordinador,

23 citrus-producing states nationwide in support of strategies SIFICIT program.

Record of pests and diseases. According to a work plan for a time and region scenarios, the mobile-app allows to the user the *n*-pests and *n*-diseases registration associated to citrus crops (Figure 4A and 4B). The registration includes the pest common and scientific name as well as organism type (fungus, virus, bacteria, etc.) (Figure 4C). There are no specific limits to the number of pests or diseases that can be recorded in the mobile-app. A dynamic programming allows the gradual integration of new organisms of concern based on regional incidence, phytosanitary status (surveillance, campaign, exploration, etc.) (Figure 4D).

Assessment scales settings. This is a dynamic module in which users set the assessment scales specific to the pests and/or diseases of concern. The assessment scales include a number of classes and a respective associated damage level, severity percentage or infestation (Figure 4E-4G). The assessment scale to be used as a qualitative or a quantitative criterion depending on user's objectives or other research criteria. Optimally, these should be based on concurrent research lines or publications accepted by the ONPF. Setting scales provide for harmonization between technicians and differentiation of assessment intensity based on the importance or concern for a particular pest or disease. Therefore, it is suitable for different phytosanitary purposes, including qualitative or quantitative surveillance systems, and research projects for phytosanitary support (Figure 4E-4G).

Sampling and/or monitoring settings. The sampling module allows customizing the assessment in the crop field (Figure 4H-4J), by selecting *n*-pests and their scale(s), previously recorded, to

Analista, etc.), generadas en una Plataforma WEB vinculada. La App, en su concepción para el sector oficial ONPF, permite realizar actividades *in situ* sincrónicas o asincrónicas en 23 estados productores de cítricos a nivel nacional en soporte a las acciones del SIFICIT.

Registro de plagas y enfermedades. En concordancia con un plan o programa de trabajo en un escenario de tiempo y región, la App permite al usuario registrar las *n*-plagas y *n*-enfermedades asociadas al cultivo de cítricos (Figura 4A y 4B). El registro debe incluir el nombre común y científico de la plaga así como el tipo de organismo (hongo, virus, bacteria, etc.) (Figura 4C). El número o cantidad de plagas o enfermedades que pueden registrarse no tiene un límite específico. Su programación dinámica permite la gradual integración de nuevos organismos de interés en función a su ocurrencia regional, estatus fitosanitario (vigilancia, campaña, exploración, etc.) (Figura 4D).

Configuración de escalas de evaluación. Es un módulo dinámico donde el usuario define las escalas de evaluación específicas a las plagas y/o enfermedades de interés. Las escalas de evaluación incluyen el número de clases y su respectivo grado de daño, porcentaje de severidad o infestación asociado (Figura 4E-4G). La escala puede ser cualitativa o cuantitativa según los objetivos o criterios de evaluación del usuario. Idealmente, estas deben basarse en líneas de investigación paralelas o publicaciones aceptadas por la ONPF. La configuración de escalas permite armonizar entre técnicos y diferenciar la intensidad de evaluación según la importancia o interés de una plaga o enfermedad en particular. Este enfoque flexibiliza la App para adecuarse a una realidad compleja y dinámica en entornos regionales y gran escala espacial. Puede por lo tanto aplicarse para diferente propósitos

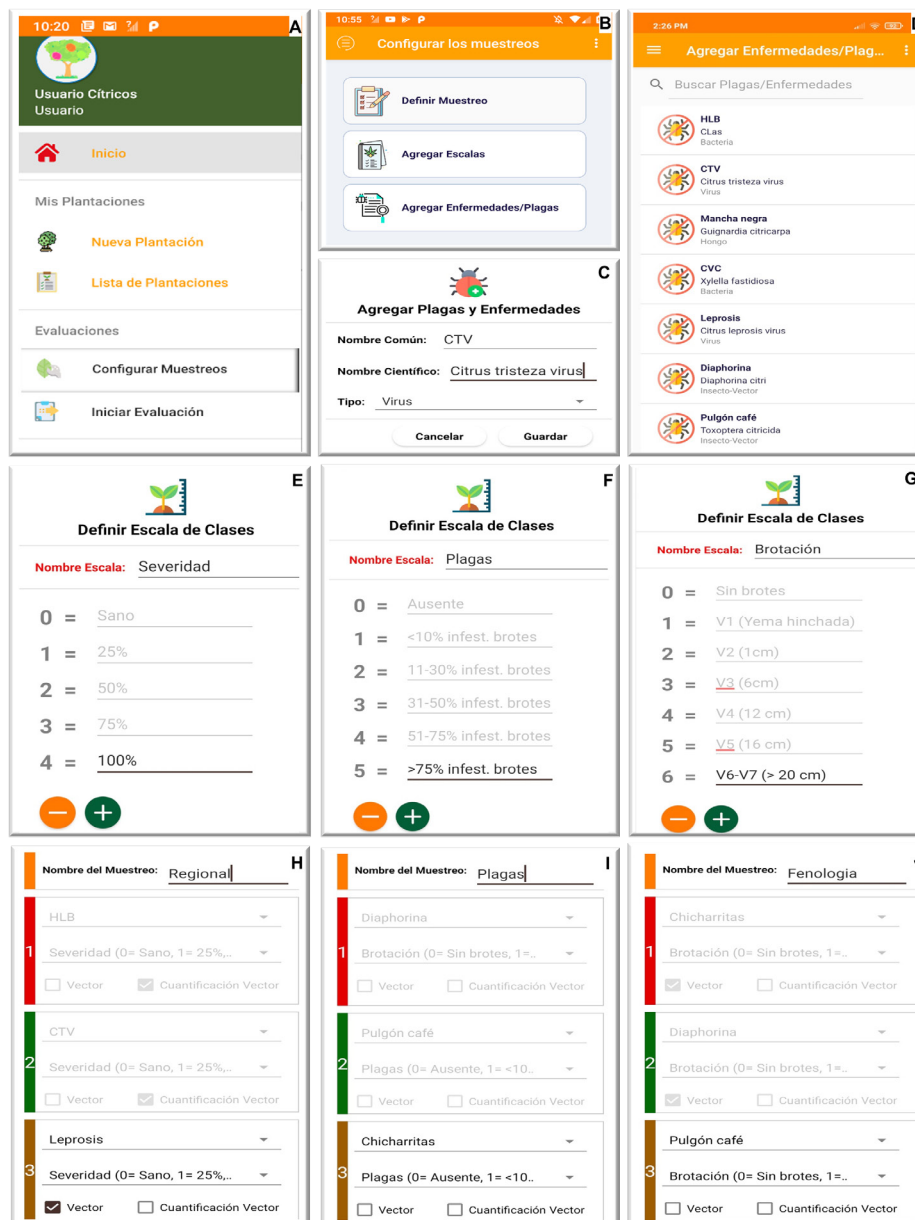


Figure 4. Interface examples of App-ExploraCítricos v2.0 for custom configuration of citrus pest and disease assessment criteria. A. Menu highlighting the sampling configuration module. B. Sampling and evaluation configuration options module. C. Module to register *n*-pests or *n*-diseases by common and scientific name and type of organism. D. Example a pests list registered by the user. E-G. Examples of user-defined scales for severity, infestation and phenology. H-J. Examples of sampling settings by selecting pests, assessment scales, and vector presence or quantification.

Figura 4. Ejemplos de interfases de la App-ExploraCítricos v2.0 para configuración personalizada de criterios de evaluación de plagas y enfermedades de cítricos. A. Menú que resalta el módulo de configuración de muestreo. B. Módulo de opciones para configuración de muestreo y evaluación. C. Módulo para registro de *n*-plagas o *n*-enfermedades por nombre común y científico y tipo de organismo. D. Ejemplo de una lista de plagas registradas por un usuario. E-G. Ejemplos de escalas para severidad, infestación y fenología definidas por el usuario. H-J. Ejemplos de configuración de muestreo seleccionando plagas, escalas de evaluación y presencia o cuantificación del vector.

assess damage or severity *in situ* (Figure 4A-4G). Using epidemiological criteria, this module allows quantification of disease-associated vectors (Figure 4H-4J). The quantification can be presence-absence level or counting of adults or other phase/stage of concern. Once the selection and configuration is complete, a name is given to the sample, e.g., 'Weekly Monitoring', saving the customization performed for use in future assessments (Figure 4H-4J). Contrary to monitoring, a sample has no progression through time. The mobile-app conception allows for both inspection processes.

Characterization of epidemiological variables.

This module is important for a plantation or production unit parameterization. The characterization includes 26 variables grouped by: site geolocation (obtained automatically), productive and epidemiological factors to measure the agronomic condition based on age, citrus species, graft-rootstock, irrigation type, nutrition, management, and other variables associated with *Epidemiological System* that can explain the pest or disease spatio-temporal intensity (Figure 3B). The component is dynamic and customizable according to the criteria or information requirements. An *ad hoc* variable selection module per component makes it possible to optimize the operability and relevance of an epidemiological exploration. This flexibility allows for adjusting the objectives, streamline assessment processes and improve the benefit/cost balance (Figure 3C).

Registration of new planting. This module allows the registration of new plantations in a local or regional environment according to pre-defined criteria for selection in a phytosanitary program. Registration of a new plantation also allows assignment of a unique ID or tracking key which allows historical traceability for monitoring

fitosanitarios, incluyendo sistemas de vigilancia cualitativos o cuantitativos y proyectos de investigación de soporte fitosanitario (Figura 4E-4G).

Configuración de muestreo y/o monitoreo. El módulo de muestreo permite personalizar la evaluación en campo (Figura 4H-4J), seleccionando *n*-plagas y su escala(s) de evaluación para medición de daño o severidad *in situ* registradas previamente (Figura 4A-4G). Adicionalmente, con criterios epidemiológicos, en este módulo es posible cuantificar los vectores asociados a enfermedades (Figura 4H-4J). La cuantificación puede ser a nivel de presencia-ausencia o contabilización directa de adultos u otra fase/estadio de interés. Al finalizar la selección y configuración, se asigna un nombre al muestreo, p.e., 'Monitoreo Semanal', el cual en futuras evaluaciones guardará la personalización realizada para usarse posteriormente (Figura 4H-4J). Contrario al monitoreo, un muestreo no tiene una progresión en el tiempo. La App permite ambos procesos de inspección.

Caracterización de variables epidemiológicas.

Este módulo es importante para la parametrización de una plantación o unidad de producción. Incluye 26 variables agrupadas por: geolocalización del sitio (obtenida automáticamente), aspectos productivos y epidemiológicos para determinar la condición agronómica basada en edad, especie cítrica, injerto-portainjerto, tipo de riego, nutrición, manejo y otras variables asociadas al *sistema epidemiológico* y que pueden explicar la intensidad espacio-temporal de una plaga o enfermedad (Figura 3B). Este componente es dinámico y configurable según los criterios o requisitos de información. Un módulo de selección de variables *ad hoc* por componente permite optimizar la operatividad y pertinencia de una exploración epidemiológica. Esta flexibilidad permite ajustar objetivos, agilizar procesos de

purposes and geolocation for analytical purposes (Figure 3A). In each plantation, n -variables of agronomic and phytosanitary management are recorded, previously preconfigured by the user for a specific official phytosanitary program (Figure 3C). These variables were conceived as part of the *Epidemiological System* and are essential for the risk analysis scenarios. Thus, for example, the citrus species and variety, the graft-rootstock, irrigation type, agronomic and phytosanitary management, foliar nutrition, soil, or combinations can explain the higher or lower HLB or CTV prevalence in each assessment site and can be integrated using algorithms for a regional risk factor.

Crop field assessment. At the start of the process, n -plants can be assessed according to the needs of the user or of a phytosanitary program. The field assessment module has no restriction on the number of plants, but preferably should be predetermined standardization purposes. In each plant is possible to assess the selected set of pests with their respective scale, as well as optionally indicate the presence, absence or quantification of vector(s) (Figure 5B, 5C). In addition, for each plant assesses, specific symptoms can be recorded with up to three images, in which kind of organ/tissue is recorded, a descriptive note added and the imaged plant is geopositioned (Figure 5D). Once the assessment is completed, the main view shows the phytosanitary status of the plant, showing whether symptoms of a pest are present, vector(s), image(s) and the georeference (Figure 5E).

Quantitative reports of a crop field assessment.

This module counterpart the automatic preliminary visualization that is generated at the end of n -plants assessment in a citrus farm (Figure 5E), considered as a population unit of test or monitoring. The report generated in this module is more descriptive and quantitative (Figure 6A – 6C). The interface

evaluación y un correcto balance beneficio/costo (Figura 3C).

Registro de nueva plantación. Este módulo permite el registro de nuevas plantaciones en un entorno local o regional según criterios preestablecidos de selección de predios en un programa fitosanitario. El registro de una nueva plantación permite la asignación de un ID o clave de seguimiento único, lo cual permite la trazabilidad histórica con fines de monitoreo o para geolocalización con fines analíticos (Figura 3A). En cada plantación se registran n -variables de manejo agronómico y fitosanitario que previamente se preconfiguran por el usuario para un programa fitosanitario específico (Figura 3C). Estas variables son concebidas como parte del *sistema epidemiológico* y son fundamentales para el análisis de escenarios de riesgo. Así, por ejemplo, la especie de cítrico y variedad, el injerto-portainjerto, tipo de riego, manejo agronómico y fitosanitario, aspectos de nutrición foliar, suelo o combinaciones pueden explicar la mayor o menor prevalencia de HLB o CTV en un predio dado e integrarse mediante algoritmos para un factor de riesgo regional.

Evaluación en campo. Este módulo permite seleccionar un predio registrado previamente y almacenado resistentemente en la App, una escala(s) de evaluación y la plaga(s) y/o enfermedad(es) de interés (Figura 5A). Al iniciar el proceso, n -plantas pueden ser evaluadas según las necesidades del usuario o de un programa fitosanitario. El módulo de evaluación en campo no restringe el número de plantas, pero idealmente debe ser prefijado con fines de estandarización. En cada planta es posible evaluar el conjunto de plagas seleccionadas con su respectiva escala, así mismo opcionalmente se puede indicar la presencia o ausencia de un vector(es) o su cuantificación (Figura 5B, 5C). Adicionalmente, por cada evaluación de planta se pueden documentar síntomas específicos mediante

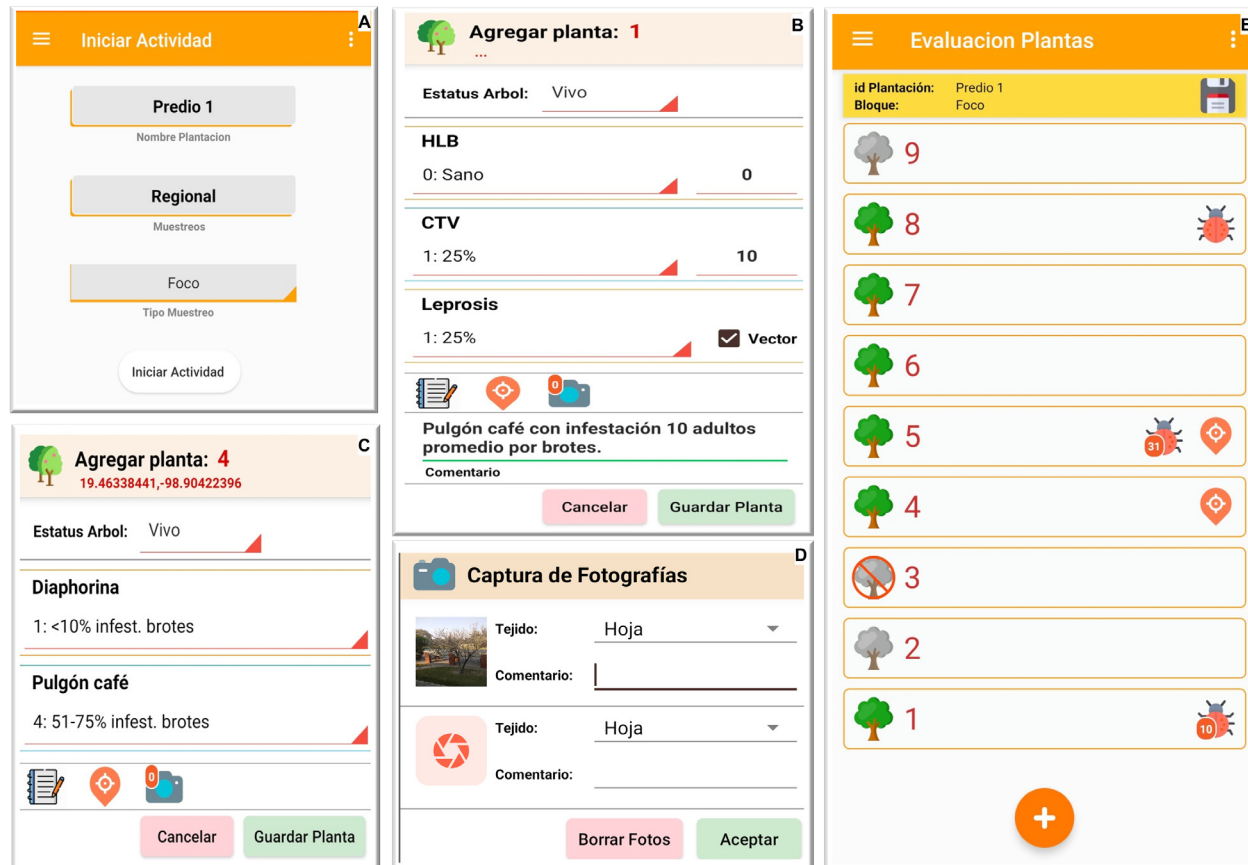


Figure 5. Interface examples of the App-ExploraCítricos v2.0 for the start and assessment process of citrus plantations in the crop field. A. Initial activity module that allows selecting a farm (*Farm 1*), sampling type (*Regional*) and area of assessment (*Foco*). B. Unit plant assessment module shows the pests selected in the settings. The example for *plant 1* shows the presence of HLB, CTV and Leprosis, with severity assessments of health, 25% and 25%, respectively. At the end, an additional comment indicating a vector infestation of 10 adults of *Toxoptera citricida* per bud. C. Example of *plant 4* with presence of *D. citri* and *T. citricida* (insect pest/vector) with scale value less than 10% and 51-75% of infested shoots, respectively. D. Section for capturing georeferenced images in which tissue type (leaf) can be placed with an associated comment. E. Comprehensive view of assessment status with 9 plants. Iconography is shown for plants (*p*) with quantification of a pest with 10 adults (*p-1*), standing dead tree (*p-2* and *p-9*), eradicated (*p-3*), georeferenced plant suspected to a pest (*p-4*), georeferenced plant with quantification of 31 adults (*p-5*), healthy (*p-6* and *p-7*), plant with pest incidence (*p-8*).

Figura 5. Ejemplo de interfases de la App-ExploraCítricos v2.0 para inicio y proceso de evaluación de plantaciones de cítricos en campo. A. Módulo inicial de actividades que permite seleccionar un predio (*Predio 1*), tipo de muestreo (*Regional*) y área de evaluación (*Foco*). B. Módulo de evaluación de plantas unitarias en el cual se muestra las plagas seleccionadas en la configuración. En el ejemplo para *planta 1* se muestra presencia de HLB, CTV y Leprosis, con evaluaciones de severidad sano, 25% y 25%, respectivamente. Al final un comentario adicional indicando una infestación de vector de 10 adultos de *Toxoptera citricida* por brote. C. Ejemplo de la *planta 4* con presencia de *D. citri* y *T. citricida* (insectos plaga/vector) con valor de escala menor a 10% y 51-75% de brotes infestados, respectivamente. D. Sección de captura de imágenes georreferenciadas en las cuales se puede colocar tipo de tejido (*hoja*) con un comentario asociado. E. Vista integral del estatus de la evaluación con 9 plantas. Se muestra iconografía para plantas (*p*) con cuantificación de una plaga con 10 adultos (*p-1*), árbol muerto en pie (*p-2* y *p-9*), erradicado (*p-3*), planta georreferenciada sospechosa a una plaga (*p-4*), planta georreferenciada con cuantificación de 31 adultos (*p-5*), sanas (*p-6* y *p-7*), planta con incidencia de una plaga (*p-8*).

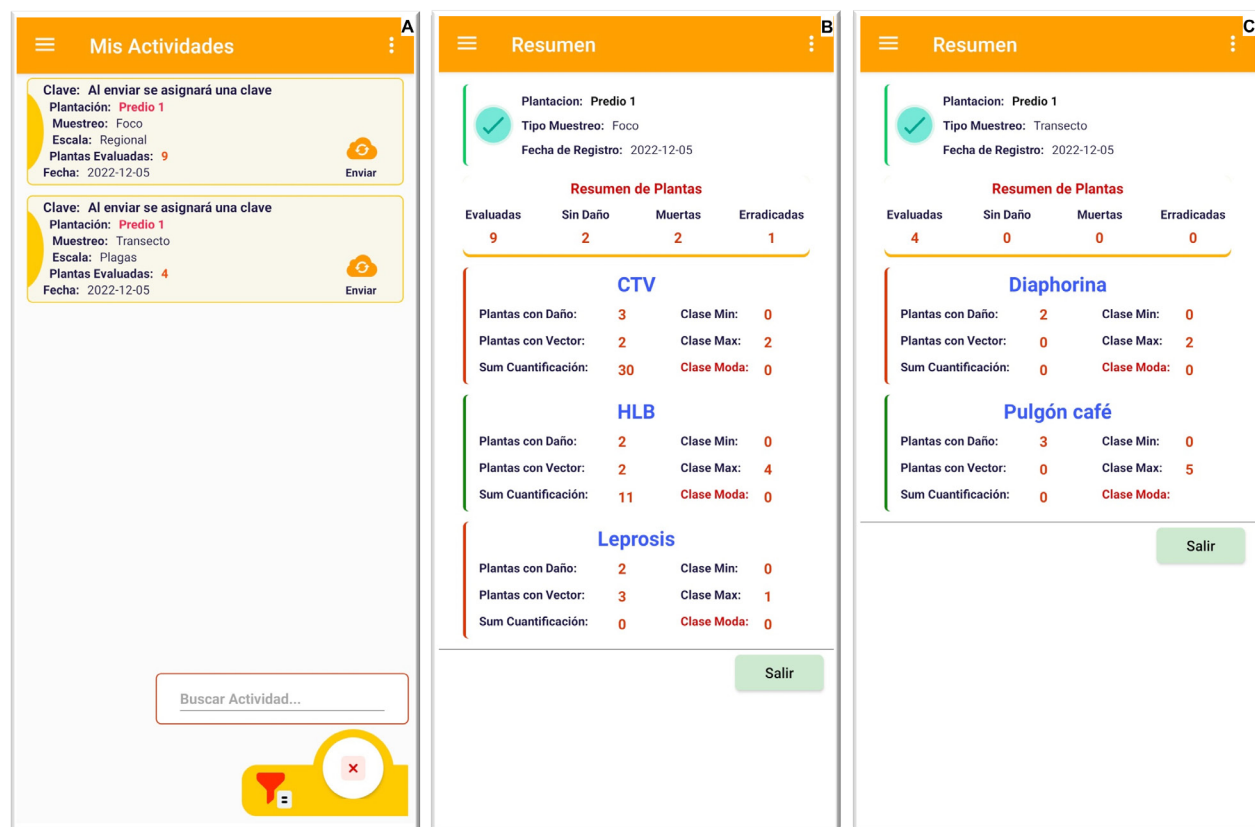


Figure 6. Interface examples of App-ExploraCítricos v2.0 for visualization of assessed farms and consulting reports of phytosanitary assessments in citrus farms. A. 'My Activities' module shows a list and general attributes of assessed farms during day(s). B. Example of a quantitative table 'Report' with records of diseased plants associated to CTV, HLB, and Leprosis for Farm 1 in a 'Focus' sampling type. C. Example of a 'Report' with records of plants infested associated to pests 'Diaphorina' (*D. citri*) and 'Pulgón café' (*T. citricida*). The vector category is only selected if the respective pathogen has been confirmed by diagnostic in the sampling region.

Figura 6. Ejemplo de interfases de la App-ExploraCítricos v2.0 para visualización de predios evaluados y consulta de resúmenes de evaluaciones sanitarias de campo en predios cítricos. A. Módulo de 'Mis Actividades' en el que se muestra la lista y atributos generales de predios evaluados durante el día(s). B. Ejemplo de un 'Resumen' tabular cuantitativo con registros de plantas enfermas con CTV, HLB y Leprosis para el Predio 1 en un muestreo en Foco. C. Ejemplo de un 'Resumen' con registros de plantas infestadas con las plagas 'Diaphorina' (*D. citri*) y 'Pulgón café' (*T. citricida*). La categoría de vector se selecciona únicamente si se ha confirmado por laboratorio el patógeno respectivo en la región de muestreo.

is controlled and consulted by the user through a list of farms assessed and registered in the resident memory of mobile device (Figure 6A). When selecting a farm of concern and option 'see Report' (Figure 7A), the summary of the assessment registered for that farm is displayed as table. The report includes the farm number, sampling type, date, all plants detected by pest or disease category,

tres fotos máximo, en las cuales se registra tipo de órgano/tejido, se incluye una nota descriptiva y se geoposiciona la planta fotografiada (Figura 5D). Al realizar la evaluación, en la vista principal se muestra el estatus fitosanitario de la planta, indicando si es sintomática de alguna plaga, si está presente un vector(es), si incluye foto(s) y la georreferencia correspondiente (Figura 5E).



Figure 7. Interface of the App-ExploraCítricos v2.0 for the management of assessment records of citrus farms. A. Log management options include 'Sending' to the web repository using Wi-Fi or mobile plan; 'Export' in MS Excel; and see 'Comprehensive Reports' of an assessment at 'Farm' level. B. Automatic view indicating that only the 'Export' and 'Report' options are functional due to local lack connectivity. C. Example of a report on the successful sending of a record/farm to the web repository. List of core modules successfully submitted and a ID assigned to the farm. In case of failures or missing data per module, an error icon indicates it. D. View of options to export data from MS Excel for each farm. They include mail, bluetooth, drive, and social networks like MSN or others.

Figura 7. Interfase de la App-ExploraCítricos v2.0 para la gestión de registros de evaluaciones de predios citrícolas. A. Opciones para gestión de registros incluyen 'Enviar' a un repositorio web mediante red wifi o datos móviles disponibles; 'Exportar' en MS Excel; y 'ver Resumen' integral de una evaluación a nivel 'Predio'. B. Vista automática que indica que únicamente las opciones 'Exportar' y ver 'Resumen' son funcionales por ausencia de conectividad local. C. Ejemplo de reporte de envío exitoso de un registro/predio al repositorio web. Enlista los módulos principales enviados exitosamente, una clave asignada al predio. En caso de fallas o datos faltantes por modulo un icono de error lo indica. D. Vista de opciones para exportar datos de MS Excel por predio. Incluyen Mail, bluetooth, drive y redes sociales como MSN u otras.

and the range of severity/infestation. The Figure 6B illustrates the report of Farm 1 for a sample type 'Focus' (i.e., a spatial aggregate of plants that have a phytosanitary pests of economic or quarantine concern), with records of plants associated with putative symptoms to CTV, HLB, and Leprosis. The Figure 6C shows the example for Farm 1 with a 'Transect' sample (i.e., sampling at kilometer intervals within a geographic route selected by risk criteria due to transport of fruit, citrus plants, harvesters, etc.).

Sending assessment carried out. This is a straightforward module that consists of sending the record of an assessment performed in a day(s) of crop field (Figure 7). The sending is controlled by the user determining the ideal time to send assessments at repository or web system for management of massive data from n -evaluators. In this research, the SIFICIT system was developed for this purpose. Based on crop field tests and validations, the sending is suggested to perform with Wi-Fi or a 'mobile plan' only with 3G or 4G signal (Figure 7A and 7B). Once sent the assessments, a report of records entered in the web system is displayed, if errors were occurs in the process an icon indicates any failure for traceability purposes (Figure 7C). Additionally, when selecting a farm of concern, consulting the 'Report' of the crop field assessment is possible, download data in MS Excel, and sending through any resources available on the smartphone such as email, bluetooth, drive, or others (Figure 7D). These last options allow providing the crop field technician with necessary information for customized reports to cooperating growers of assessed farms, productive associations, and local phytosanitary managers. Note that a web system is designed to generate automatic reports focused on decision-making and early warnings. Therefore, the technician also has this virtual resource.

Resumen cuantitativo de una evaluación en campo. Este módulo complementa la visualización preliminar automática que se genera al finalizar la evaluación de n -plantas en un predio citrícola (Figura 5E), considerado éste como unidad poblacional de muestreo o monitoreo. El resumen generado en este módulo es más descriptivo y cuantitativo (Figura 6A - 6C). La interfase es controlada y consultada por el usuario a través de una lista de predios evaluados y registrados en la memoria residente del dispositivo móvil (Figura 6A). Al seleccionar un predio de interés y la opción 'ver Resumen' (Figura 7A), se muestra tubularmente el resumen de la evaluación sanitaria registrado para ese predio. Incluye el número de predio, tipo de muestreo, fecha, la totalidad de plantas detectadas por categoría de plaga o enfermedad, y el rango de daño/infestación. La Figura 6B ilustra el resumen del Predio 1 para un tipo de muestreo en 'Foco' (i.e., un agregado espacial de plantas que poseen un problema sanitario de interés económico o cuarentenario), con registros de plantas con síntomas putativos a CTV, HLB y Leprosis, mientras que la Figura 6C muestra el Predio 1 de un muestreo en 'Transecto' (i.e., muestreo a intervalos de kilómetros dentro de una ruta geográfica seleccionada por criterios de riesgo debido a transporte de fruta, plantas de cítricos, cosechadores, etc.).

Envío de evaluaciones realizadas. Es un módulo simple que consiste en enviar el registro de una evaluación(es) realizadas en un día(s) de trabajo en campo (Figura 7). El envío es controlado por el usuario en todo momento, por lo que éste determina el momento ideal para realizar el envío a un repositorio o sistema web preconfigurado para la gestión de datos masivos provenientes de n -evaluadores. En esta investigación, se desarrolló el sistema SIFICIT para ese fin. Con base en pruebas y validaciones de campo se sugiere realizar con WiFi o 'plan de

Review of activities and App settings. The mobile-app has a module that allows the user to review the status of activities performed and accumulated during a period (interface not shown). This allows consulting the assessments sent, pending completion in a specific farm, or pending of send to the web repository. If Wi-Fi internet connection or 'mobile plan' is not available, only the consulting reports and export files to share via email and other social networks or send are allowed. The data recorded in the device's resident memory is never lost, even if the battery disables the device during an assessment in the crop field, so the availability is guaranteed for local use, re-assess, or shipment when connectivity conditions allow it. Once a record was sent to web repository, this option is disabled to avoid duplication of information and to avoid compromising the performance of algorithms designed for decision-making in a web system. The mobile-app allows and guarantees that crop field actions are protected against any sending problems. Some components are included, such as the selection of GPS accuracy selection based on the available mobile device, even sending backups and a database copy hosted locally to support technicians with possible shipments problems.

DISCUSSION

The use of digital tools for implementation in operational surveillance systems under the preventive approach have shown the assertiveness to articulate phytosanitary management programs based on decision making assisted by automated algorithms and management of large volumes of data in real-time (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). *Prevention* implies a regional approach and a set of decision criteria and dynamic early warnings differentiated by agroecological conditions (Mora-

datos' únicamente si la receptividad es 3G ó 4G (Figura 7A y 7B). Una vez enviado, se muestra un resumen de los registros ingresados al sistema web y en caso de errores, un icono indica cualquier falla con fines de trazabilidad (Figura 7C). Adicionalmente, al seleccionar un predio de interés es posible consultar el 'Resumen' de la evaluación de campo, descargar datos en MS Excel y enviar por alguno de los recursos disponibles en el smartphone como el correo electrónico, bluetooth, Drive u otro (Figura 7D). Estas últimas opciones permiten proporcionar al técnico de campo la información necesaria para reportes personalizados a productores cooperantes de predios evaluados, asociaciones productivas y directivos fitosanitarios locales. Notar que un Sistema web esta diseñado para generar reportes automáticos enfocados a toma de decisiones y alertas tempranas. Por lo que el técnico también cuenta con este recurso virtual.

Revisión de actividades y configuración de la App. La App posee un módulo que permite al usuario la revisión del estatus de actividades realizadas y acumuladas durante un periodo (interfase no mostrada). Este permite consultar las evaluaciones enviadas, pendientes de terminar en un predio específico, o pendientes de enviar al repositorio web. En caso de no contar con una conexión de internet WiFi o 'plan de datos', únicamente es permitido realizar consultas de resúmenes y exportar archivo para compartir vía mail y otras redes sociales o envío. Los datos registrados en la memoria residente del dispositivo nunca se pierden, aun si la batería deshabilita el dispositivo durante una evaluación en campo, por lo que esta garantizada su disponibilidad para uso local, retomar una evaluación, o envío cuando las condiciones de conectividad lo permitan. Una vez que un registro es enviado a un repositorio web, esta opción se deshabilita para evitar duplicidad de información y para no

Aguilera *et al.*, 2021; Flores-Sánchez *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016). This is currently possible with the digital technology, its economy and connectivity coverage (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014c). However, despite their effectiveness, surveillance systems that integrate a web interface and mobile applications have been limited mainly to the scope of NPPOs or RPPOs (Regional Plant Protection Organizations) and in few productive chains such as coffee (*Coffea arabica*), blue agave (*Agave tequilana*) and citrus (*Citrus* spp.) (Mora-Aguilera *et al.*, 2021).

The experience with Surveillance Systems classified as level 3 shows the requirement of sophisticated Apps designed to evaluate a wide set of variables such as phenology, inoculum loads, crop damage, production, etc. Its function, in conjunction with a web environment, is the generation of effective early warnings for the intervention of an epidemic process. However, Surveillance Systems type 1 and 2, have pest detection at regional level as the main purpose (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). In these cases, digital systems have lacked the productive contextualization due to the emphasis on pest inspection. The App-ExploraCítricos v2.0 fills this gap by integrating 26 variables of the productive system to identify anthropocentric predisposing factors in the pests occurrence of economic or quarantine importance. For example, the differential predisposition of sour citrus over sweet citrus to CLas infection is widely recognized (Mora-Aguilera *et al.*, 2014a, 2014b). The App also incorporates personalized configuration in the entire structural conception of the digital model of health management. Thus, for example, it is possible to delimit from the 26 productive variables those to be recorded specifically for the purpose of an epidemiological diagnosis in a region of interest, making evaluations more expeditious. Likewise, specific pests of interest in such diagnosis can be

comprometer el desempeño de algoritmos concebidos para toma de decisiones de un sistema web. La App permite y garantiza que las acciones de campo se protejan ante cualquier problema de envío. Se incluyen algunos componentes como selección de la precisión GPS en función del teléfono disponible, hasta envío de respaldos y copia de base de datos alojadas en el teléfono para apoyar a técnicos con posibles problemas en envíos.

DISCUSIÓN

El uso de herramientas digitales para implementación en sistemas de vigilancia operativos y con enfoques preventivos han mostrado la asertividad y necesidad para articular programas de manejo fitosanitario basados en toma de decisiones asistidas por algoritmos automatizados y gestión de grandes volúmenes de datos en tiempo real (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). La *prevención* implica un enfoque regional y un conjunto de criterios de decisión y alertas tempranas dinámicas diferenciadas por condiciones agroecológicas (Mora-Aguilera *et al.*, 2021; Flores-Sánchez *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016). Actualmente esto es posible con la tecnología digital, su economía y cobertura de conectividad (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014c). Sin embargo, a pesar de su efectividad, los sistemas de vigilancia que integran una interfaz web y aplicaciones móviles se han limitado principalmente al ámbito de ONPFs o ORPFs (Organismos Regionales de Protección Fitosanitaria) y en pocas cadenas productivas como cafeto (*Coffea arabica*), agave azul (*Agave tequilana*) y cítricos (*Citrus* spp.) (Mora-Aguilera *et al.*, 2021).

La experiencia con Sistemas de Vigilancia tipificados como nivel 3 es que requieren App sofisticadas diseñadas para evaluar un amplio conjunto de variables como fenología, cargas de inóculo,

recorded. For example, the inclusion of CTV, HLB and Leprosis, current priorities of the AMEFIs (<https://acortar.link/oLCu0l>), instead of all citrus pests of economic interest present in Mexico (<https://acortar.link/tCjHx9>).

The configuration of flexible and independent scales is also one of the great successes of the App to confer greater precision in the health risks characterization as opposed to other fixed and disease specialized approaches (Pethybridge and Nelson, 2018; Pethybridge and Nelson, 2015). The presence or absence of a pest is a very limited attribute for making strategic decisions such as eradication or exclusion with strong commercial implications. The 'Regulatory' Surveillance Systems type 1 and 2, have as main purpose to update the pests official lists in an NPPO in adherence to the original conception of the International Standard for Phytosanitary Measures 6 and 5 (ISPM 6, ISPM 5), published by the International Plant Protection Convention (IPPC), endorsed by FAO (<https://www.ippc.int/es/>), where surveillance is defined as '*An official process to collect and record information on the presence or absence of a pest through the use of surveys, monitoring or other procedures*' (ISPM 5). These systems were not intended for phytosanitary intervention using *preventive* or *protective* approaches, this is the essence of Type 3 Surveillance Systems (Mora-Aguilera *et al.* 2021).

The potential applicability of App ExploraCítricos v2.0 in official phytosanitary strategies has been emphasized. However, its simplicity and flexibility were intended for eventual use by the productive sector or researchers at the field unit level. The download options in MS Excel format and delivery via virtual network options were intended for field units use without a web repository. Sanitary monitoring under the responsibility of the productive sector has not been

daño, producción, etc. Su función, en conjunción con un entorno web, es la generación de alertas tempranas efectivas para la intervención de un proceso epidémico. Sin embargo, Sistemas de Vigilancia tipo 1 y 2, tienen como fin principal la detección de una plaga en un ámbito regional (Mora-Aguilera *et al.*, 2021). En este caso, los sistemas digitales han adolecido de la contextualización productiva por el énfasis en la inspección de la plaga. La App ExploraCítricos v2.0 subsana este vacío al integrar 26 variables del sistema productivo para identificar factores de predisposición antropocéntricas en la ocurrencia de plagas de importancia económica o cuarentenaria. Por ejemplo, la predisposición diferencial de cítricos agrios sobre los dulces a CLas es ampliamente aceptada (Mora-Aguilera *et al.*, 2014a, 2014b). La App también incorpora la configuración personalizada en toda la concepción estructural del modelo digital de gestión sanitaria. Así, por ejemplo, se puede acotar de las 26 variables productivas aquellas que se desean registrar para los objetivos de un diagnóstico epidemiológico en una región en particular, haciendo más expeditas las evaluaciones. Así mismo, se pueden registrar las plagas específicas que en dicho diagnóstico son de interés. Por ejemplo, CTV, HLB y Leprosis, prioridades actuales de las AMEFIs (<https://acortar.link/oLCu0l>), como alternativa a la totalidad de plagas de los cítricos de interés económico presentes en México (<https://acortar.link/tCjHx9>).

La configuración de escalas flexibles e independientes es también uno de los grandes aciertos de la App para conferir mayor precisión en la caracterización de riesgos sanitarios en contraposición a otros enfoques fijos y especializados a una enfermedad (Pethybridge y Nelson, 2018; Pethybridge y Nelson, 2015). La presencia o ausencia de una plaga es un atributo muy limitado para toma de decisiones estratégicas como *erradicación* o *exclusión* con fuertes implicaciones comerciales. Los Sistemas

adopted as a productive culture. However, under the current social and environmental demands, the increase of certification programs for commercial, organic production, food safety, and sanitary fields (for example, plots for free-virus buds production), and the generalization of digital technology in transition to the ‘internet of things’ will make it essential to adopt productive digital traceability.

The design of simple, iconographic, flexible, and intuitive Apps will be essential for the adoption of these technologies (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). App ExploraCítricos incorporates iconography for this purpose. Additionally, the authors, with a similar conception, generated App Monitor v2.1 available in ‘Play store’ for any crop and without the need for user authentication and web repositories, a restriction of other generic Apps (Aanensen *et al.*, 2009). The feasibility of programming Apps with Android® has favored the development of mobile applications for agricultural and phytosanitary use in recent years. However, the epidemiological and productive systemic conception has been neglected, affecting its functionality, the excessive processes fragmentation, and emphasis on orchard/field visions (Pethybridge and Nelson, 2018; Pethybridge and Nelson, 2015). Understanding an epidemiological process is essential for the development of relevant and transversal digital technologies. Thus, in the context of the COVID-19 emergency, the vision and epidemiological principles used in this work allowed the generation of a qPCR diagnostic protocol articulated with ambulatory digital surveillance (Mora-Aguilera *et al.*, 2022).

The conception of digital models with the rational framework of the *Epidemiological System*, and the plant (crop) as the integrating phytosanitary axis, guarantees the *holistic-systemic* vision to which phytosanitary programs must move in the face of the growing demand for healthy and sufficient food,

de Vigilancia ‘Normativa’ tipo 1 y 2, tienen como propósito principal la elaboración de listas oficiales de plagas en un ONPF en adherencia a la concepción original de la Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias 6 y 5 (NIMF 6, NIMF 5), publicadas por la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), adscrita a la FAO (<https://www.ippc.int/es/>), donde se define a la vigilancia como ‘*Un proceso oficial para recopilar y registrar información sobre la presencia o ausencia de una plaga mediante el uso de encuestas, monitoreo u otros procedimientos*’ (NIMF 5). Estos sistemas no tuvieron como fin aplicarse a modelos fitosanitarios de intervención con fines *preventivos* o *protectivos*, esencia de los Sistemas de Vigilancia tipo 3 (Mora-Aguilera *et al.* 2021).

Se ha enfatizado la potencial aplicabilidad de App ExploraCítricos v2.0 en modelos oficiales fitosanitarios. Sin embargo, su simplicidad y flexibilidad tuvo como propósito el eventual uso por el sector productivo o investigadores a nivel parcelario. Las opciones de descarga en formato MS Excel y en envío por opciones de redes virtuales tuvieron como fin el uso parcelario prescindiendo de un repositorio web. El monitoreo sanitario bajo responsabilidad del sector productivo no se ha adoptado como una cultura productiva. Sin embargo, ante exigencias sociales y ambientales, el incremento de diversos programas de certificación en el ámbito comercial, orgánico, inocuidad, sanitario (p.e., lotes para producción de yemas libres) y la generalización de la tecnología digital en transición hacia el ‘internet de las cosas’ harán imprescindible la adopción de la trazabilidad digital productiva.

El diseño de Apps simples, iconográficas, flexibles e intuitivas serán fundamentales para la adopción de estas tecnologías (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). App ExploraCítricos incorpora iconografía en este propósito. Adicionalmente, los autores, con una concepción análoga, generaron App Monitor

resilience of productive systems to climate change, environmental care, and preservation of productive resources (i.e., soil, plant genetic resources, water). However, phytosanitary digitization implies innovation challenges in the scientific-technological field, institutional management models and regional sanitary operating systems (Mora-Aguilera *et al.*, 2021).

It is urgent to promote digital technological initiatives to avoid delays of the NPPOs in the insertion of Agriculture 4.0, before aspiring to the next technological generation, 5.0, where countries such as China and Japan are already exploring. Agriculture 4.0, currently led by supplies companies, i.e., fertilizers, pesticides, automation, and robotics, respond to strong commercial interests and do not necessarily favor the vision of health *prevention* and the preservation of regional productive resources (https://play.google.com/store/apps/details?id=com.app.syngentasoluciones&hl=es_MX&gl=US; <https://play.google.com/store/apps/details?id=mx.bayer.micultivo&hl=es&gl=US>). Technological, democratic, and inclusive digitization is a goal aligned with the humanistic spirit of agriculture and the urgent demand for new agricultural paradigms, including conservation, organic, and agroecological agriculture, oriented towards the sustainability of environmental resources.

CONCLUSIONS

The functional prototype App-ExploraCítricos v2.0 is a digital innovation for comprehensive citrus pest surveillance. The systemic conception, modular structure, and flexible setting for multi-pest sampling and monitoring according to the regional diversity of citrus production systems provide to this development a great potential to be used in the

v2.1 disponible en 'Play Store' para cualquier cultivo y sin necesidad de autenticación de usuario y repositorios web, una restricción de otras Apps genéricas (Aanensen *et al.*, 2009). La factibilidad de programación de Apps con Android® ha favorecido en los últimos años el desarrollo de aplicaciones móviles para uso agrícola y fitosanitario. Sin embargo, se ha descuidado la concepción sistémica epidemiológica y productiva afectando su funcionalidad, la fragmentación excesiva de los procesos y énfasis en visiones parcelarias (Pethybridge y Nelson, 2018; 2015). La comprensión de un proceso epidemiológico es fundamental para el desarrollo de tecnologías digitales pertinentes y transversales. Así, ante la emergencia de COVID-19 la visión y principios epidemiológicos empleados en este trabajo permitió la generación de una propuesta de diagnóstico qPCR articulado a una vigilancia digital ambulatoria (Mora-Aguilera *et al.*, 2022).

La concepción de modelos digitales con el marco racional del *sistema epidemiológico*, y la planta (cultivo) como eje integrador de la sanidad, garantiza la visión *holística-sistémica* a la que programas fitosanitarios deben transitar ante la creciente demanda de alimentos sanos y suficientes, resiliencia al cambio climático de los sistemas productivos, cuidado ambiental, y preservación de los recursos productivos (i.e., suelo, acervo vegetal, agua). Sin embargo, la digitalización fitosanitaria implica retos de innovación en los ámbitos científico-tecnológico, modelos de gestión institucionales y sistemas operativos sanitarios regionales (Mora-Aguilera *et al.*, 2021).

Es urgente impulsar iniciativas tecnológicas digitales para evitar rezagos de los ONPF en la inserción de la Agricultura 4.0, antes de aspirar a la siguiente generación tecnológica, la 5.0, donde ya incursionan países como China y Japón. La Agricultura 4.0, actualmente liderada por empresas de insumos, i.e., fertilizantes, agrotóxicos,

management and prevention of phytosanitary risks. App-ExploraCítricos was validated in 58 sour and sweet citrus plantations of San Luis Potosí, Veracruz, and Chiapas states for regional transect, focus and perifocal sampling of CTV, CLas, CiLV and their respective vectors. A total of 37700 metadata were generated and stored in a web environment. The flexibility, intuitiveness, operability and effective data management were confirmed at the device resident level, as well as in the virtual data sending in real-time, MS Excel format export, sending via mail and other network modalities. The App-ExploraCítricos v2.0 is registered in the public copyright registry (INDAUTOR) with number 03-2022-022112203600-01.

ACKNOWLEDGMENTS

To the CP-LANREF team for the logistical and operational support. To SENASICA and the State Plant Health Committee of Sinaloa for the financing and administrative management for the execution of this project.

CITED LITERATURE

- Aanensen DM, Huntley DM, Feil EJ, al-Own FA and Spratt BG. 2009. EpiCollect: Linking smartphones to web applications for epidemiology, ecology and community data collection. Plos one 4(9): e6968. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006968>
- Flores-Sánchez JL, Mora-Aguilera G, Loeza-Kuk E, López-Arroyo JI, Gutiérrez-Espinosa MA, Velázquez-Monreal JJ, Domínguez-Monge S, Bassanezi RB, Acevedo-Sánchez G and Robles-García P. 2017. Diffusion model for describing the regional spread of Huanglongbing from first-reported outbreaks and basing an area wide disease management strategy. Plant Disease 101:1129-1127. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-16-0418-RE>
- Guzmán-Hernández E, Flores-Colorado OE, Acevedo-Sánchez G, Mora-Aguilera G, López-Javier MA y González-Gómez R. 2017. APPS como Herramientas de Soporte Epidemiológico Aplicado a Sistemas Regionales de Vigilancia Epidemiológica. Revista Mexicana de Fitopatología, 35 (Suplemento): 184. https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen352017/VOLUMEN_35_SUPLEMENTO_2017.pdf
- Mora-Aguilera G, Martínez-Bustamante V, Acevedo-Sánchez G, Coria-Contreras JJ, Guzmán-Hernández E, Flores-Colorado OE, Mendoza-Ramos C, Hernández-Nava G,

automatización y robótica, responden a fuertes intereses comerciales y no necesariamente favorecen la visión de la *prevención* sanitaria y la preservación de activos productivos regionales (https://play.google.com/store/apps/details?id=com.app.syngentasoluciones&hl=es_MX&gl=US; <https://play.google.com/store/apps/details?id=mx.bayer.micultivo&hl=es&gl=US>). La digitalización tecnológica, democrática e incluyente, es un meta acorde con el espíritu humanístico de la agricultura y de la urgente demanda de nuevos paradigmas agrícolas, incluyendo la agricultura de conservación, orgánica, agroecológica, orientados a la sustentabilidad de los recursos ambientales.

CONCLUSIONES

El prototipo funcional App ExploraCítricos v2.0 es una innovación digital para la vigilancia integral de plagas citrícolas. Su concepción sistémica, estructura modular, y configuración flexible para el muestreo y monitoreo multiplaga acorde a la diversidad regional de los sistemas productivos citrícolas le confieren a este desarrollo un gran potencial para uso en la gestión y prevención de riesgos fitosanitarios. App ExploraCítricos fue validada en 58 plantaciones de cítricos agrios y dulces en los estados de San Luis Potosí, Veracruz y Chiapas en muestreos regionales trasectuales, foco y perifoco de CTV, CLas, CiLV y sus respectivos vectores. Se generaron y almacenaron 37700 metadatos en un entorno web. Se confirmó la flexibilidad, intuitividad, operatividad y gestión efectiva de datos tanto a nivel residente en dispositivo como en envío virtual de datos en tiempo real, exportación en formato MS Excel, envío vía correo y otras modalidades de redes. La App ExploraCítricos v2.0 está inscrita en los registros públicos del derecho de autor (INDAUTOR) con el número de registro 03-2022-022112203600-01.

- Álvarez-Maya I, Gutiérrez-Espinosa MA, Gómez-Linton R, Robles-Bustamante AC, Gallardo-Hernández A. 2022. Surveillance web system and mouthwash-saliva qPCR for labor ambulatory SARS-CoV-2 detection and prevention. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(3):1271. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031271>
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Guzmán-Hernández E, Flores-Colorado OE, Coria-Contreras JJ, Mendoza-Ramos C, Martínez-Bustamante VI, López-Buenfil A, González-Gómez R and Javier-López MA. 2021. Web-based epidemiological surveillance systems and applications to coffee rust disease. *Mexican Journal of Phytopathology* 39(3): 452-492. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2104-6>.
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Guzmán-Hernández E, Coria-Contreras JJ, Mendoza-Ramos C, Jiménez-González L, Santana-Peñaloza B, González-Gómez R, López-Buenfil A, López-Javier M y Carranza P. 2016. Criterios epidemiológicos de accionabilidad regional para control de la roya del café en México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 34S: 23. https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen342016/Suplemento_34_2016.pdf
- Mora-Aguilera G, Flores-Sánchez F, Acevedo-Sánchez G, Domínguez-Monge S, Oropeza-Salinas C, Flores-Olivas A, González-Gómez R y Robles-García P. 2014a. Epidemiological surveillance and current status of coconut lethal yellowing, potato purple top and citrus Huanglongbing (HLB) in Mexico. *Mexican Journal of Phytopathology* 32(2): 120-131. https://www.researchgate.net/publication/300533174_Epidemiological_Surveillance_and_Current_Status_of_Coconut_Lethal_Yellowing_Potato_Purple_Top_and_Citrus_Huanglongbing_HLB_in_Mexico
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Domínguez-Monge D, Coria-Contreras JJ, Hernández-Hernández E, González-Gómez R, López-Buenfil A, Sánchez-Anguiano H, García-Feria J, Trujillo-Arriaga J, López-Pérez E, Méndez-Ramos A, Matuz-Conde J and Martínez-Bolaños M. 2014b. Epidemiological surveillance system for coffee rust disease (*Hemileia vastatrix*) in Mexico: A regional approach. *In: The 25th International Conference on Coffee Science*. 8-13 Septiembre. Armenia, Colombia. 1-6pp. https://www.researchgate.net/publication/306347540_Epidemiological_Surveillance_System_for_Coffee_Rust_Disease_Hemileia_vastatrix_in_Mexico_A_Regional_Approach
- Mora-Aguilera G, Robles-García P, López-Arroyo JL, Flores-Sánchez J, Acevedo-Sánchez G, Domínguez-Monge D and González-Gómez R. 2014c. Current situation and management perspectives of Citrus HLB. *Mexican Journal of Phytopathology* 32(2): 108-119. https://rmf.smf.org.mx/Vol_32_2_2014.html
- Pethybridge SJ and Nelson SC. 2018. Estimate a new ipad application for assessment of plant disease severity using photographic standard area diagrams. *Plant Disease* 102: 276-281. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-17-1094-SR>
- Pethybridge SJ and Nelson SC. 2015. Leaf Doctor: A new portable application for quantifying plant disease severity. *Plant Disease* 99: 1310-1316. <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- Salcedo BD, Hinojosa R, Mora-Aguilera G, Covarrubias I, De Paolis JRF, Mora S y Cántora C. 2010. Evaluación del Impacto Económico de Huanglongbing (HLB) en la Cadena Citrícola Mexicana. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). México. 141 p. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/7271>

AGRADECIMIENTOS

Al equipo CP-LANREF por el soporte logístico y operativo. Al SENASICA y Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Sinaloa por el financiamiento y gestión administrativa para la ejecución de este proyecto.

~~~~~ Fin de la versión en Español ~~~~~