



Implementation of a Pervasive Video Game with Mobile Sensing Features

Claudio Rubio and Felipe Besoain

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

July 8, 2024

Implementation of a pervasive video game with mobile sensing features

Claudio Rubio¹, Felipe Besoain²

Resumen—This research presents the development of *Kaboom*, a mobile application designed to promote physical activity through a video game that leverages contextual game mechanics. This contextualization is done by incorporating geolocation and step counting as core components. The system utilizes mobile device sensors to gather environmental data, which is then stored in the cloud. Each sensor operates independently, allowing for modular adjustments without complex changes. This modularity enables the seamless addition or removal of components, facilitating a flexible user experience. A feasibility test was made to highlighted unanticipated use cases, such as the potential energy consumption from continuous geolocation requests and the importance of protecting user telemetry data. The test confirmed consistent sensor calibration across different devices with different mobile providers and hardware. Future work will focus on improving the application by addressing newly identified use cases, integrating additional environmental sensors, optimizing battery usage, perform usability tests outside of a laboratory context, and applying persuasive game design principles to encourage healthy behaviors.

Index Terms—Mobile devices, Mobile Sensing, Videogames, Sensors

I. INTRODUCCIÓN

La falta de actividad física es uno de los principales factores de riesgo de enfermedades no transmisibles (ENT) y muerte a nivel mundial. Según estadísticas de la OMS, realizar regularmente algún tipo de actividad física reduce el riesgo de padecer diversas enfermedades. Por ejemplo, reduce el riesgo de padecer un cáncer en un 8%-28%; enfermedades cardíacas y accidentes cerebrovasculares en un 19%; la diabetes en un 17%, la depresión y la demencia en un 28-32% [1]. Se predice que si no se modifica el comportamiento sedentario en la población, entre 2020 y 2030 se producirán alrededor de 500 millones de casos nuevos de ENT. El tratamiento de estos nuevos casos costará unos 27 mil millones de dólares anuales en costo de atención [2]. También se estima que se podrían evitar entre 4 y 5 millones de muertes al año si la población mundial fuera más activa.

Diversas han sido las estrategias que buscan informar a la comunidad sobre temas nutricionales y su impacto en la actividad física, como las redes sociales [3], contenido multimedia e iniciativas preventivas [4], foros en línea [5], exergames, realidad virtual [6] y aplicaciones móviles [7], [8], [9]. Debido a su naturaleza ubicua, los dispositivos móviles se han vuelto parte del ecosistema diario de las personas, integrándose en sus hábitos y rutinas.

Sin embargo, aunque la literatura ha demostrado que el uso de teléfonos móviles y estrategias virtuales han sido eficaces para promover comportamientos saludables en diferentes dominios [9], [10], [11], [12], la incorporación de componentes

ambientales en el desarrollo de experiencias interactivas que integren activamente las mediciones obtenidas por los sensores han sido menos evidentes. Varios estudios señalan que los dispositivos móviles tienen un potencial único para recolectar datos telemétricos, permitiendo reconocer las características del entorno [13], [14], [15]. Sin embargo las integraciones recopilan datos de manera pasiva, sin que el usuario interactúe directamente con la experiencia.

Aún cuando estas estrategias cumplen su objetivo, no incorporan los componentes contextuales como una componente que afecte la experiencia de usuario. En consecuencia, no se aprovecha el potencial para reconocer el contexto ambiental y su posible aplicación en el diseño y desarrollo de experiencias que potencien la inmersión y la interactividad.

En cambio, los videojuegos presentan espacios dedicados a la interactividad, en donde el usuario debe participar activamente del desarrollo de la historia. Para ello, el jugador toma un rol dentro de la experiencia que lo hace avanzar a través de una narrativa. Esta inmersión propicia una conexión con el medio, potenciando la motivación del usuario para participar conscientemente del desarrollo de la experiencia de juego. De igual manera, han demostrado ser herramientas capaces de potenciar la interactividad mediante una gran variedad de contenidos educativos, consiguiendo tan buenos o mejores resultados que las estrategias tradicionales para promover comportamientos saludables, en consecuencia, se han convertido en formas poderosas de discurso político, ético y religioso, cambiando la forma en como enseñamos, aprendemos y creamos [16]. Otro beneficio de este medio es que permite diseñar experiencias inmersivas que motivan a los usuarios a participar de un ambiente interactivo, rompiendo las barreras psicológicas que podría limitar la disposición a integrar comportamientos saludables a su esquema mental [17].

En este contexto, es propicio integrar estrategias que permitan identificar activamente los elementos ambientales, facilitando así el diseño de experiencias para dispositivos móviles que impulsen la actividad física. Este trabajo se centra en fomentar la actividad física a través de un videojuego para dispositivos móviles que integre componentes contextuales en sus mecánicas. Sin embargo, la incorporación de información del entorno al diseño de juego plantea desafíos técnicos como la captura y el almacenamiento del contexto del usuario. En este sentido, el *mobile sensing* emerge como un factor crucial que permite recoger datos en tiempo real, interpretando así el contexto del usuario y empleándolo en la creación de narrativas que estimulen la actividad física.

El presente documento se divide en: Metodología, en donde se planteará la arquitectura de la aplicación, así como 2 casos de usos que describen la interacción de los usuarios con el sistema; Resultados, en donde presenta el videojuego y un estudio de usabilidad derivado, permitiendo conocer el desempeño de la herramienta, también presenta el análisis de los datos obtenidos a través de los sensores “Conteo de Pasos” y “Geolocalización”; Finalmente, la sección de Conclusiones y Trabajo Futuro resume el trabajo realizado y presenta las futuras modificaciones técnicas que se realizarán a los componentes de software.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación sigue la estructura Design and Creation [18], una estrategia iterativa de cinco pasos donde investigación y desarrollo colaboran estrechamente. Este método proporciona directrices para desarrollar una arquitectura que permita la recolección de datos telemétricos a través de videojuegos para dispositivos móviles.

II-A. Conciencia del problema y Sugerencia

La disposición de contraer enfermedades derivadas de la baja actividad física se ha visto en aumento por el estilo de vida sedentario, afectando negativamente la calidad de vida de la comunidad. En este contexto, las aplicaciones para dispositivos móviles se han presentado como herramientas atractivas e innovadoras que permiten promover comportamientos saludables. Reconocer el contexto del usuario es fundamental para diseñar e implementar experiencias que sean efectivas en la promoción de estos comportamientos. Para ello, ideamos un videojuego para dispositivos móviles que integra la actividad física en su mecánica principal de juego a través de los sensores de los dispositivos móviles. El concepto del videojuego, también conocido como Kaboom, es aprovechar los componentes de geolocalización y el conteo de pasos, para desarrollar un juego que motive a los usuarios a moverse. Mediante esta experiencia, el juego y el ejercicio físico se fusionan, animando a los jugadores a caminar o correr en una carrera contrarreloj, promoviendo así la salud a través del juego interactivo.

II-B. Desarrollo

La implementación del videojuego fue realizada mediante el motor de videojuegos Unity 3D y C# [19]. La arquitectura del sistema está diseñada para recopilar datos telemétricos de los sensores móviles y almacenarlos en una base de datos MySQL. El juego presenta una mecánica central de bomba y temporizador, donde los jugadores deben moverse físicamente para ganar tiempo adicional. La arquitectura del juego se divide en tres capas: Presentación, Dominio (Núcleo) y Datos, tal como se puede apreciar en la Figura 1. Este enfoque modular asegura flexibilidad y escalabilidad para incorporar diversos sensores y ajustar las mecánicas del juego sin cambios complejos. El detalle de cada capa del sistema se describe a continuación:

■ Presentación

- Clientes (Android): Interfaz gráfica de usuario (GUI) basada en componentes de texto que permitan visualizar UI de tiempo, pasos del usuario, tiempo de juego, imágenes e objetos 3D.
- Servidor: No implementa ninguna GUI.

■ Dominio (Núcleo):

- Clientes (Android): Todos los controladores visuales del sistema, así como sus interacciones lógicas. El sistema permite la integración dinámica de sensores, permitiendo agregar o quitar funcionalidades según corresponda. También permite crear dinámicamente las tablas para almacenar la información de los sensores, por lo que no es necesario crear manualmente las nuevas tablas al momento de integrar un nuevo sensor. También realiza las consultas con la base de datos MySQL para obtener y almacenar nuevos datos.
- Servidor: No implementa infraestructura.

■ Datos:

- Clientes (Android): Información persistente de la aplicación. Principalmente para almacenar los datos capturados por los sensores en un determinado tiempo.
- Servidor: Base de datos que almacena la información de los sensores.

Para entender como funciona el software, se presentan dos casos de uso generales: 1) Captura y almacenamiento de datos telemétricos a través de sensores de dispositivos móviles (ver I); y 2) Integración de sensores en mecánica de juego (ver II). Estos casos de uso explican brevemente los procesos e interacciones con los usuarios y varios componentes de la solución. Adicionalmente permitieron tomar las siguientes consideraciones al momento de diseñar la experiencia:

- Diseñar una escena de juego que integre los datos capturados por los sensores en la mecánica de juego.
- Construir arquitectura de base de datos para almacenar la información capturada por los sensores.
- Evaluar las percepciones de los usuarios a lo largo del tiempo.
- Generar retroalimentación para los usuarios (tiempo y distancia recorrida).

| | |
|------------------------|--|
| Caso de Uso: | Capturar y guardar datos telemétricos en base de datos |
| Actor: | Usuario y Sistema |
| Propósito: | Recopilar datos de los sensores de dispositivos móviles en tiempo real. |
| Resumen: | Este caso de uso comienza cuando el jugador inicia la aplicación. El software presenta una narrativa en la cual se presenta el contexto de juego, la jugabilidad y la interacción del sistema con el usuario. Una vez que el jugador apreta el botón para iniciar la experiencia, se traslada a una nueva escena. En esta escena hay un contador de tiempo que se reduce continuamente, el usuario puede aumentar el valor de este contador mediante la actividad física. Los datos de los sensores son recopilados localmente y posteriormente enviados a la base de datos para su tratamiento. Este caso finaliza cuando el jugador se queda sin tiempo en el contador de la escena. |
| Precondiciones: | (1) La aplicación debe estar instalada en el dispositivo móvil del usuario. (2) Debe haber una base de datos en la nube que permita recopilar los datos para el posterior tratamiento. |

Cuadro I: Captura y almacenamiento de datos telemétricos a través de sensores de dispositivos móviles

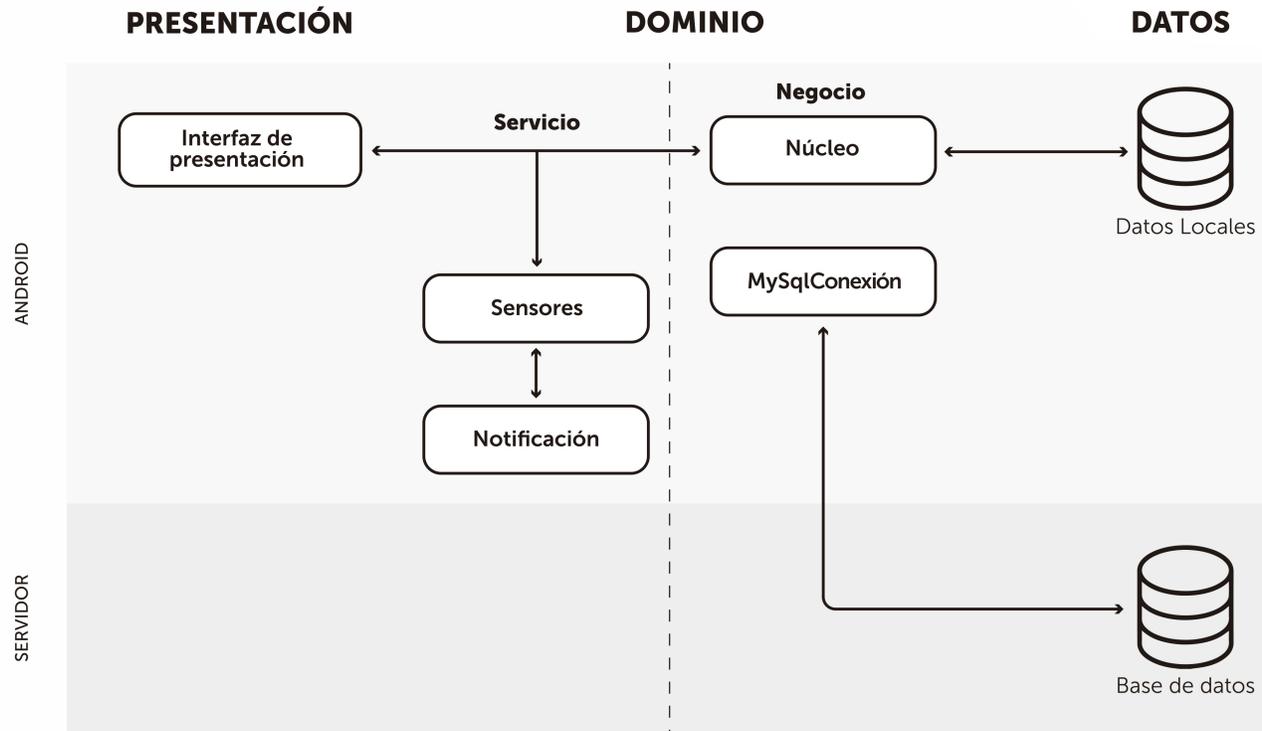


Figura 1: Arquitectura de la solución, diagrama de capas con representación cliente (Dispositivos Android) - Servidor (Backend) y sus componentes. La arquitectura fue adaptada de [20] e incorporar los sensores y notificaciones como componentes funcionales.

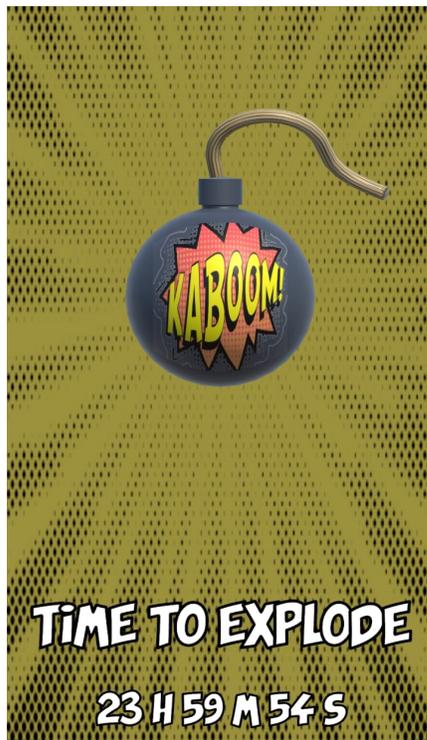
| | |
|------------------------|--|
| Caso de Uso: | Integrar datos de sensores en mecánica de juego. |
| Actor: | Usuario y Sistema |
| Propósito: | Integrar datos telemétricos a mecánicas de videojuego. |
| Resumen: | Este caso de uso comienza cuando el sistema solicita al usuario los permisos para utilizar los sensores de movimiento del dispositivo. Una vez que el usuario accede, el sistema comienza a capturar los datos de los sensores: i) Localización y ii) Conteo de Pasos. Posteriormente, estos valores son utilizados para modificar el contador de tiempo de la escena principal. Este caso termina cuando el usuario cierra la aplicación o cuando se queda sin tiempo en el contador. |
| Precondiciones: | (1) La App debe solicitar los permisos de usuarios para recolectar la información de los sensores del dispositivo. |

Cuadro II: Integración de sensores en mecánica de juego

Considerando esta estructura, se desarrolló Kaboom, un videojuego diseñado para fomentar la actividad física mediante la integración de componentes contextuales basados en datos de sensores de geolocalización y conteo de pasos en dispositivos móviles. La narrativa del juego comienza con una introducción en formato de cómic, donde el personaje principal llega a casa y encuentra un paquete sospechoso que contiene una bomba. Al descubrir que el temporizador de la bomba se incrementa con el movimiento, el personaje se da cuenta de que debe mantenerse activo para evitar la explosión. Esta historia se traduce en la pantalla principal del juego, representada en la figura 2a, donde los jugadores enfrentan una bomba y un temporizador que solo pueden extender realizando

actividad física. El objetivo es moverse continuamente para ganar tiempo adicional, prolongando el ciclo de juego hasta que el temporizador finalmente agota su cuenta regresiva y la bomba explota, llevándolos a la escena final.

En la escena final, el jugador es llevado de vuelta a la narrativa en cómic, mostrando el desenlace tras la explosión de la bomba. Además, se proporciona retroalimentación sobre su desempeño durante la sesión de juego, mostrando tres valores clave: i) el puntaje, calculado en función de ii) la duración adicional ganada mediante la actividad física, y iii) la cantidad de pasos dados durante ese período, como se ilustra en la figura 2b. Este diseño no solo motiva a los jugadores a mantenerse activos, sino que también les proporciona una evaluación tangible de su rendimiento físico y estratégico en el juego, cerrando la experiencia de manera informativa y envolvente.



(a) Escena principal de juego. En el centro se visualiza una bomba que explotará cuando el temporizador de abajo llegue a 0. Mientras mayor sea la actividad física que realice el usuario, mayor será el valor del temporizador.



(b) Escena Final del juego. Cuando el temporizador se agote, pasa directamente a la escena final, en esta se muestra su puntuación, tiempo total y cantidad de pasos desde que inició la aplicación por primera vez.

Figura 2: Interacción del usuario con Kaboom

III. RESULTADOS

III-A. Procedimiento

La aplicación fue probada en 5 dispositivos con diferentes características, como se indica en la tabla III. Para evitar errores en las mediciones, la prueba fue realizada en el mismo intervalo de tiempo por la misma persona. El procedimiento fue el siguiente:

1. Se descargó la aplicación en todos los dispositivos.
2. Se aceptó los permisos de Localización y Reconocimiento de Actividad Física en cada uno de los dispositivos.
3. Se realizó una vuelta de 30 minutos por el campus universitario.
4. Se volvió al punto de partida y cerró la aplicación en todos los dispositivos.

III-B. Estudio de factibilidad

Del procedimiento se observaron los siguientes aspectos: 1) La aplicación envía eficientemente la información de los sensores a la base de datos; 2) No existen diferencias significativas entre las diferentes mediciones obtenidas por los sensores en el intervalo de tiempo asignado; 3) La calibración de las mediciones de localización es correcta, permitiéndonos determinar la trayectoria de los usuarios y detectar zonas de mayor incidencia colectiva, como se puede ver en la figura 4. También pudimos notar las siguientes características a partir de los datos de los dispositivos móviles:

- La diversidad en las especificaciones de los dispositivos probados (como procesadores MediaTek, Snapdragon y

Exynos, así como diferentes capacidades de RAM) muestra que la aplicación es capaz de funcionar de manera eficiente en una amplia gama de hardware.

- A pesar de las diferencias en el sistema operativo (versiones de Android 10 a 12), la aplicación mantuvo un rendimiento consistente, lo que sugiere una buena compatibilidad y optimización del software.
- La variabilidad en la capacidad de la batería y las tecnologías de carga rápida indican que la aplicación puede necesitar optimizaciones para minimizar el impacto en la duración de la batería, especialmente en dispositivos con menor capacidad o carga más lenta.
- Las diferencias en conectividad (4G y 5G) no afectaron significativamente el rendimiento de la aplicación, lo que sugiere que los datos transmitidos no son altamente dependientes del ancho de banda de la red.
- Teniendo en cuenta que los datos recuperados son telemétricos, es necesario implementar un filtro de seguridad, asegurando la protección de los mismos. Utilizar otro formato de base de datos como Firebase podría ser eficaz para encriptar y asegurar los datos de los usuarios.

| Especificación | Moto G54 4G | Xiaomi Redmi Note 8 | Samsung S22 Plus | Samsung Galaxy S20 FE | Xiaomi T11 Pro |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Pantalla | 6.5 pulgadas, Full HD+ | 6.3 pulgadas, Full HD+ | 6.6 pulgadas, Dynamic AMOLED 2X | 6.5 pulgadas, Super AMOLED | 6.67 pulgadas, AMOLED |
| Resolución | 2400 x 1080 píxeles | 2340 x 1080 píxeles | 2340 x 1080 píxeles | 2400 x 1080 píxeles | 2400 x 1080 píxeles |
| Procesador | MediaTek Dimensity 720 | Qualcomm Snapdragon 665 | Exynos 2200 / Snapdragon 8 Gen 1 | Exynos 990 / Snapdragon 865 | Qualcomm Snapdragon 888 |
| RAM | 4GB | 3GB | 8GB | 6GB | 8GB |
| Almacenamiento | 64GB | 32GB | 128GB | 128GB | 128GB |
| Batería | 5000 mAh, carga rápida 30W | 4000 mAh, carga rápida 18W | 4500 mAh, carga rápida 45W | 4500 mAh, carga rápida 25W | 5000 mAh, carga rápida 67W |
| Conectividad | 4G, Wi-Fi, Bluetooth 5.1 | 4G, Wi-Fi, Bluetooth 4.2 | 5G, Wi-Fi 6, Bluetooth 5.2 | 4G, Wi-Fi 6, Bluetooth 5.0 | 5G, Wi-Fi 6, Bluetooth 5.2 |
| Sistema Operativo | Android 11 | Android 10 | Android 12 | Android 12 | Android 11 |
| Compañía de Internet | Claro | Claro | Entel | Movistar | WOM |

Cuadro III: Comparación de especificaciones técnicas de dispositivos móviles

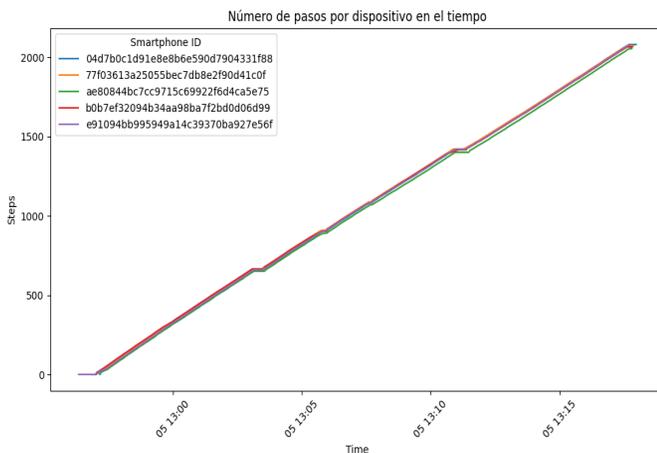


Figura 3: Conteo de pasos obtenidos a través de diferentes dispositivos en un mismo periodo de tiempo, el intervalo considera 30 minutos.

IV. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Una aplicación llamada Kaboom fue diseñada y desarrollada con el objetivo de promover actividad física a través de un videojuego que utiliza de componentes contextuales como mecánica de juego. Este trabajo planteó la geolocalización y el conteo de pasos de los usuarios como componentes de juego que permiten mejorar el diseño de una experiencia interactiva para la promoción de la salud.

Nuestro sistema permite obtener datos ambientales a través de sensores para dispositivos móviles y posteriormente ser almacenados en la nube. Cada uno de estos sensores funciona como un componente independiente. Un potencial beneficio de esta implementación es la modularidad para añadir y/o remover componentes, permitiendo ajustar la experiencia sin la necesidad de realizar cambios complejos.

La prueba de factibilidad técnica permitió observar 2 casos de usos que no fueron considerados previamente, así como sus implicancias en la experiencia de juego. Adicionalmente, pudimos corroborar que la calibración de los sensores no presenta diferencias significativas entre dispositivos con características diferentes.

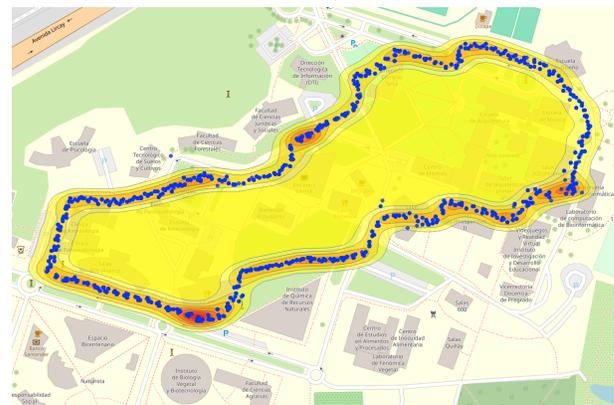


Figura 4: Mapa de calor del recorrido en un intervalo de 30 minutos. Los puntos azules presentan la ruta recorrida, las zonas amarillas presentan una interacción leve, mientras que las zonas rojas representan las áreas de mayor interacción.

Si bien solamente se presentan las estadísticas de 5 dispositivos, las diferencias técnicas entre estos nos permiten reconocer que la aplicación puede obtener componentes contextuales independientemente de las características del equipo. Adicionalmente, las pruebas fueron realizadas en un corto periodo de tiempo, lo cual no nos permite conocer el impacto de la experiencia en un contexto diario.

Considerando lo anterior, los trabajos futuros deben ir ligados en mejorar la aplicación tanto técnica como narrativamente, teniendo en cuenta esto, las futuras implementaciones se enfocarán en:

- Mejorar el diseño de la aplicación con los nuevos casos de uso detectados.
- Integrar otros sensores ambientales que permitan obtener más información del contexto del usuario.
- Implementar optimizaciones de batería para reducir el impacto del sensing en el dispositivo móvil.
- Realizar pruebas de usabilidad en un ambiente fuera de laboratorio para medir el efecto de la aplicación en la promoción de la actividad física en un contexto real.
- Mejorar la narrativa mediante la aplicación de teorías persuasivas para promover comportamientos saludables.

REFERENCIAS

- [1] W. H. O. Who, "Physical activity," *World Health Organization: WHO*, May 2019. [Online]. Available: https://www.who.int/health-topics/physical-activity#tab=tab_2
- [2] A. C. Santos, J. Willumsen, F. Meheus, A. Ilbawi, and F. C. Bull, "The cost of inaction on physical inactivity to public health-care systems: a population-attributable fraction analysis," *The Lancet Global Health*, vol. 11, no. 1, pp. e32–e39, 2023.
- [3] B. Lohse, "Facebook is an effective strategy to recruit low-income women to online nutrition education," *Journal of nutrition education and behavior*, vol. 45, no. 1, pp. 69–76, 2013.
- [4] W. D. Evans, J. Necheles, M. Longjohn, and K. K. Christoffel, "The 5-4-3-2-1 go! intervention: social marketing strategies for nutrition," *Journal of Nutrition Education and Behavior*, vol. 39, no. 2, pp. S55–S59, 2007.
- [5] N. L. Cohen, E. T. Carbone, and P. A. Beffa-Negrini, "The design, implementation, and evaluation of online credit nutrition courses: a systematic review," *Journal of nutrition education and behavior*, vol. 43, no. 2, pp. 76–86, 2011.
- [6] Z. Gao, J. E. Lee, D. J. McDonough, and C. Albers, "Virtual reality exercise as a coping strategy for health and wellness promotion in older adults during the covid-19 pandemic," p. 1986, 2020.
- [7] M. Hingle, M. Nichter, M. Medeiros, and S. Grace, "Texting for health: the use of participatory methods to develop healthy lifestyle messages for teens," *Journal of nutrition education and behavior*, vol. 45, no. 1, pp. 12–19, 2013.
- [8] F. Besoain, A. Perez-Navarro, F. Ojeda, and J. A. Reyes-Suarez, "Promoting healthy nutrition behavior using mobile devices and ubiquitous computing," in *Ambient Assisted Living. ICT-based Solutions in Real Life Situations: 7th International Work-Conference, IWAAL 2015, Puerto Varas, Chile, December 1-4, 2015, Proceedings 7*. Springer, 2015, pp. 89–100.
- [9] F. Besoain, A. Perez-Navarro, C. J. Aviñó, J. A. Caylà, N. A. Barriga, P. G. de Olalla *et al.*, "Prevention of hiv and other sexually transmitted infections by geofencing and contextualized messages with a gamified app, ubesafe: design and creation study," *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 8, no. 3, p. e14568, 2020.
- [10] J. Finkelstein, E. M. Cha *et al.*, "Using a mobile app to promote smoking cessation in hospitalized patients," *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 4, no. 2, p. e5149, 2016.
- [11] J. C. Shin, J. Kim, and D. Grigsby-Toussaint, "Mobile phone interventions for sleep disorders and sleep quality: systematic review," *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 5, no. 9, p. e7244, 2017.
- [12] M. Lee and M. You, "Effects of covid-19 emergency alert text messages on practicing preventive behaviors: Cross-sectional web-based survey in south korea," *Journal of medical Internet research*, vol. 23, no. 2, p. e24165, 2021.
- [13] M. R. Mehl, M. Eid, C. Wrzus, G. M. Harari, U. W. Ebner-Priemer, and T. R. Insel, "Mobile sensing in psychology: methods and applications," (*No Title*), 2024.
- [14] N. van Berkel, S. D'Alfonso, R. Kurnia Susanto, D. Ferreira, and V. Kostakos, "AWARE-Light: a smartphone tool for experience sampling and digital phenotyping," *Pers. Ubiquit. Comput.*, vol. 27, no. 2, pp. 435–445, Apr. 2023.
- [15] S. Teng, S. D'Alfonso, and V. Kostakos, "A Tool for Capturing Smartphone Screen Text," in *ACM Conferences*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, May 2024, pp. 1–24.
- [16] H. J. Brown, *Videogames and education*. Routledge, 2014.
- [17] P. Molins-Ruano, C. Sevilla, S. Santini, P. A. Haya, P. Rodríguez, and G. Sacha, "Designing videogames to improve students' motivation," *Computers in Human Behavior*, vol. 31, pp. 571–579, 2014.
- [18] B. J. Oates, M. Griffiths, and R. McLean, *Researching information systems and computing*. Sage, 2022.
- [19] "Plataforma de desarrollo en tiempo real de Unity | Motor de 3D, 2D, VR y AR," Jul. 2024, [Online; accessed 1. Jul. 2024]. [Online]. Available: <https://unity.com/es>
- [20] F. Besoain and I. Gallardo, "Think about it: Promoting physical activity with a mobile app with a theory-based approach," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 37 021–37 030, 2023.