



Caso Piano Colors: mejora iterativa de una interfaz para niños con síndrome de Down

Gonzalo Emilio Díaz Julio

gonzalodiazj@usm.cl

Liubov Dombrovskaja
Profesora Guía

Dayana Carillo
Profesora Correferente

Resumen: Chile presenta una alta prevalencia de síndrome de Down (SD), lo que plantea desafíos en inclusión educativa, especialmente en el uso de aplicaciones debido a barreras cognitivas, motoras y sensoriales. Esta investigación propone mejorar la accesibilidad de Piano Colors, una aplicación de aprendizaje musical para niños con SD, mediante un rediseño iterativo centrado en usabilidad y autonomía. La metodología incluyó pruebas formativas (3 niños) y una sumativa (10 niños) en la Fundación EDUDOWN, evaluando tasa de éxito e intervenciones adultas. Los resultados mostraron un 91.7% de efectividad en tareas y una reducción a 0.5 intervenciones promedio por sesión, validando que interfaces inclusivas (simplicidad, retroalimentación multisensorial y gamificación) potencian el aprendizaje independiente. El estudio demuestra que la tecnología adaptada puede cerrar brechas educativas en esta población, ofreciendo un modelo aplicable a otras herramientas pedagógicas.

Palabras Clave: Diseño inclusivo, Síndrome de Down, Aprendizaje musical, Tecnología accesible, Usabilidad.

1 Introducción

Chile presenta una de las prevalencias más altas de síndrome de Down (SD) a nivel mundial, con aproximadamente 2.7 casos por cada mil nacimientos, cifra que duplica el promedio global [1]. Esta realidad no solo refleja una particularidad demográfica, sino que también plantea un desafío urgente para el sistema educativo, el cual debe responder con estrategias que garanticen una inclusión real y efectiva. Frente a esto, el diseño centrado en el usuario (DCU) se posiciona como un enfoque clave, ya que permite desarrollar herramientas educativas desde las necesidades concretas de los estudiantes, sus familias y los docentes, integrando sus voces en cada etapa del proceso. A diferencia de modelos estandarizados, el DCU busca soluciones adaptables, participativas y contextualizadas, asegurando que la inclusión no sea solo un principio teórico, sino una práctica tangible que mejore la calidad de vida y el aprendizaje de las personas con SD. Así, esta investigación explora cómo esta metodología puede contribuir a cerrar las brechas existentes, transformando los desafíos educativos en oportunidades de innovación social.

El aprendizaje musical es fundamental para los niños con SD porque actúa como una herramienta pedagógica motivadora e inclusiva, ayudando a compensar algunas de las dificultades asociadas a esta condición. Entre sus principales beneficios se encuentra el desarrollo cognitivo, ya que estimula las conexiones neuronales, mejora la memoria, la atención y el procesamiento de la información, aspectos clave en niños con SD, quienes suelen presentar un ritmo de aprendizaje más lento. En el ámbito psicomotor, la música es especialmente útil para mejorar la coordinación, el equilibrio y la tonicidad muscular, características que suelen verse afectadas en estos niños debido a la hipotonía propia del síndrome [2]. En cuanto al lenguaje y la comunicación, la música funciona como un medio alternativo de expresión, facilitando el desarrollo de habilidades comunicativas incluso en casos donde el lenguaje verbal está menos desarrollado. Además, contribuye al desarrollo emocional y social,



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Caso Piano Colors: mejora iterativa de una interfaz para niños con síndrome de Down

Nombre del candidato(a): Gonzalo Emilio Díaz Julio

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Informática

Campus: Santiago San Joaquín; Departamento: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Liubov Dombrowskaia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20-08-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 19-08-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



permitiendo sentar las bases para el desarrollo de habilidades como la empatía y el trabajo en equipo [3]. En general, la música es un elemento muy atractivo para las personas con SD, lo que la convierte en una vía de aprendizaje poderosa y motivadora. Su versatilidad crea ambientes positivos y de igualdad de oportunidades, y, sobre todo, una intervención oportuna puede conducir a un desarrollo más cercano al típico [4].

La tecnología musical adaptada amplifica estos beneficios al ofrecer herramientas personalizadas que superan las barreras físicas y cognitivas propias del SD. Estudios demuestran que interfaces interactivas, instrumentos adaptados y aplicaciones con retroalimentación visual-auditivo no solo potencian los efectos cognitivos y motores de la música tradicional (como la mejora en memoria, coordinación y lenguaje), sino que además incrementan la motivación y autonomía mediante diseños accesibles [5]. Además, la integración de inteligencia artificial está demostrando, que la adaptabilidad tecnológica puede personalizar el aprendizaje musical según cada perfil neurocognitivo, haciendo que los beneficios descritos en la música tradicional sean más accesibles, medibles y escalables.

Las herramientas o aplicaciones específicamente desarrolladas para niños o personas con SD son muy limitadas. Una de las pocas propuestas relacionadas es *Motion Compose* [32], una aplicación que transforma el movimiento corporal en sonido y música. Aunque fue diseñada para personas con diversidad funcional en general, y no específicamente para personas con SD, en el estudio se incluyó la participación de una persona con esta condición, lo que sugiere su posible utilidad en este contexto. Por otro lado, en los últimos diez años solo se ha identificado una aplicación desarrollada específicamente para personas con SD orientada al ámbito musical: *MyDanceDown* [33], enfocada en el aprendizaje de pasos básicos de danza clásica. Esta recopilación, resumida en la Tabla Anexo A.1, evidencia una escasa presencia de la música en la educación de este grupo y su integración con la tecnología.

A partir de dicha recopilación, es posible observar varias limitaciones en las soluciones actuales. En primer lugar, existe una baja disponibilidad de aplicaciones específicamente diseñadas para la enseñanza musical en personas con SD, lo que refleja una integración limitada de la música y la tecnología en su educación. Además, muchas de las herramientas disponibles se concentran en áreas como el lenguaje, la memoria, las matemáticas o las habilidades básicas, dejando de lado otros aspectos importantes del desarrollo integral, como la creatividad, el arte o la expresión emocional. Otra limitación significativa es que muchas aplicaciones son solo prototipos, con poca validación práctica o sin pruebas reales con usuarios, lo que reduce su efectividad en contextos educativos reales. Incluso en estos casos, algunas interfaces presentan instrucciones complejas o poco accesibles, lo que dificulta su uso autónomo por parte de los niños.

Asimismo, un elemento común en varias de las aplicaciones identificadas es el uso de estrategias de gamificación. Esta se integra como recurso principal en muchas herramientas educativas dirigidas a niños con SD, gracias a su potencial para aumentar la motivación, la atención y el aprendizaje [15]. Estas herramientas utilizan el juego como núcleo del proceso educativo, fomentando la participación del usuario. Entre los recursos gamificados más frecuentes se encuentran elementos multimedia atractivos, sistemas de recompensas, retroalimentación inmediata, personajes animados y tutores virtuales que guían al usuario mediante instrucciones y mensajes de apoyo. No obstante, aunque la gamificación aporta beneficios significativos, también se han señalado algunas limitaciones, entre ellas el alto costo de desarrollo [34] y la falta de garantías sobre la autonomía del niño para utilizar la aplicación sin asistencia [35].

En respuesta a estas limitaciones, la presente investigación propone y evalúa una solución tecnológica diseñada específicamente para este contexto. Piano Colors es una aplicación educativa diseñada para enseñar piano a niños con SD mediante un enfoque multisensorial que asocia notas musicales con figuras geométricas y colores. Desarrollada en 2024 como proyecto de ingeniería informática, digitaliza el método PianoUp [49] —originalmente basado en materiales físicos—, incorporando reconocimiento de audio en tiempo real, un asistente virtual de voz y módulos interactivos (lecciones graduales, minijuegos y generador de canciones). Su diseño centrado en el usuario busca promover la autonomía, superando limitaciones de aplicaciones existentes mediante interfaces accesibles, retroalimentación inmediata y adaptación a necesidades cognitivas y motoras



específicas. Esta investigación evalúa y mejora iterativamente su usabilidad, con el fin de establecer un modelo replicable para herramientas tecnológico-musicales inclusivas.

El objetivo general de esta investigación es mejorar la interfaz de usuario (UI) de la aplicación Piano Colors para niños con síndrome de Down, hacerla más accesible y personalizada, permitiendo que los niños puedan interactuar de manera autónoma y completar las tareas de aprendizaje musical de forma exitosa.

Los objetivos específicos son:

- Adaptar la interfaz de Piano Colors a las necesidades cognitivas y motrices de los niños con SD, tomando en cuenta su ritmo de aprendizaje.
- Implementar mejoras en la UI que reduzcan la necesidad de intervención constante por parte de adultos durante el uso de la aplicación.
- Evaluar la efectividad de la interfaz mediante pruebas iterativas centradas en la accesibilidad y usabilidad para niños con SD.
- Desarrollar herramientas que fomenten la autonomía de los niños en la realización de tareas dentro de la aplicación, garantizando una experiencia de usuario adecuada a su perfil.

El documento se organiza en cinco capítulos principales: (1) Introducción, que contextualiza el problema, los beneficios de la música para niños con síndrome de Down y presenta la aplicación Piano Colors brevemente; (2) Marco teórico, donde se fundamentan las bases de diseño inclusivo y las características cognitivas, motoras y sensoriales de esta población; (3) Metodología, que describe el proceso iterativo de diseño centrado en el usuario, incluyendo pruebas formativas y sumativas; (4) Mejora iterativa, dedicado a los rediseños de las interfaces clave, los resultados de las pruebas y los ajustes realizados; y (5) Conclusiones, que sintetizan los logros, limitaciones y futuras líneas de investigación. Esta estructura mantiene un flujo lógico desde la fundamentación teórica hasta la validación práctica, asegurando coherencia y rigor en el desarrollo del estudio.

2 Marco Teórico

Las personas con síndrome de Down tienen características cognitivas, motoras y sensoriales que afectan su interacción con la tecnología.

2.1 Características cognitivas

En primer lugar, poseen una discapacidad intelectual en distintos niveles, lo que conlleva un retraso en el desarrollo cognitivo. Generalmente, su coeficiente intelectual se sitúa entre 30 y 70 [6]. Esta característica afecta la interacción de diversas formas:

- Dificultad para leer y comprender los contenidos [23].
- Inestabilidad para recordar lo aprendido, lo que significa que conceptos o funciones que no se usan constantemente pueden olvidarse fácilmente [7].
- Se benefician de instrucciones claras y precisas, preferiblemente habladas [37].
- Suelen necesitar ayuda para iniciar o completar tareas [31] [35].
- El diseño de interfaces debe ser simple para reducir sobrecarga cognitiva y facilitar la comprensión [19] [23].
- Su aprendizaje se facilita enormemente si se apoya con signos, gestos, señales, imágenes, dibujos, gráficos o cualquier otro tipo de clave visual [10].

2.2 Características motoras

En segundo lugar, especialmente en los niños, pueden presentar dificultades en la coordinación óculo-manual y en la motricidad fina [8]. Estas habilidades son necesarias para interactuar con la mayoría de las tecnologías.

Según lo reportado en [7], estas dificultades se observan en problemas con la precisión de movimientos finos como pantallas táctiles o mouse. En otro estudio, notaron problemas de precisión cuando los elementos interactivos son pequeños o requiere de movimientos y clics certeros [10]. Las interacciones que requieren acciones simultáneas, como “presionar y arrastrar”, suelen representar un desafío debido a la dificultad para coordinar movimientos distintos. Lo mismo ocurre con el “doble toque”, ya que las personas con SD tienden a presionar repetidamente la pantalla. En cambio, interacciones como *Tap* o *Slide* resultan más accesibles y presentan mejores tasas de éxito [11].

2.3 Características sensoriales

En tercer lugar, las personas con síndrome de Down suelen presentar alteraciones sensoriales:

- Alteraciones auditivas: la prevalencia de pérdida auditiva en niños con SD oscila entre el 34 y el 36% [9].
- Trastornos oftalmológicos: aproximadamente el 70–85% de los niños y adolescentes con SD presentan manifestaciones oftalmológicas, como miopía, hipermetropía, astigmatismo y estrabismo [12].

Estas condiciones pueden dificultar la lectura de textos con letra pequeña, provocar confusión entre imágenes o íconos con formas o colores similares, y, si la retroalimentación visual no es clara, dificultar la identificación de elementos que no han sido correctamente seleccionados.

El diseño de aplicaciones educativas es especialmente relevante para los niños con síndrome de Down debido a los múltiples beneficios que el uso de las TIC puede aportar de manera transversal a su vida. Las personas con esta condición presentan necesidades y preferencias específicas de aprendizaje, y las aplicaciones educativas tienen el potencial de adaptarse a estas particularidades. Al incorporar apoyos visuales y sonoros, las TIC favorecen la retención y el procesamiento de información, ayudan a comprender conceptos abstractos y refuerzan habilidades sensoriales y motoras [13]. Su carácter interactivo promueve la accesibilidad y la inclusión, ofreciendo diversas oportunidades dentro de los entornos educativos [14].

Estas herramientas también representan un valioso recurso para familias y profesionales, ya que permiten crear entornos de aprendizaje dinámicos, con nuevas formas de comunicación y una amplia variedad de recursos [14]. Además, pueden contribuir al desarrollo de habilidades como la autonomía, la resolución de problemas y las competencias digitales básicas, incorporando estrategias como el ensayo-error o la repetición de tareas [15].

Cabe destacar que las plataformas virtuales registran el comportamiento durante el aprendizaje, facilitando el seguimiento del progreso y la retroalimentación inmediata. Esto permite al profesional o tutor ajustar el nivel de dificultad según las necesidades del estudiante [16][17]. Incluso en adultos jóvenes, el uso de dispositivos móviles y aplicaciones diseñadas con su participación y validación puede facilitar actividades cotidianas como desplazarse en transporte público, fomentando su independencia y una mayor participación en la comunidad [18].

La música aporta beneficios en diversas áreas del desarrollo de estos niños. Según [2], contribuye al desarrollo psicomotor, al requerir concentración y coordinación en el movimiento; al desarrollo cognitivo, al estimular las conexiones neuronales y la capacidad sináptica; y al desarrollo lingüístico, al mejorar las habilidades verbales y favorecer tanto el lenguaje comprensivo como el expresivo. También incide positivamente en el desarrollo emocional, al ofrecer un medio para expresar emociones y sentimientos, y en el desarrollo social, al promover la cohesión y la expresión grupal.

Por otra parte, según [3], la música capta la atención de manera más dinámica que otros estímulos y puede mejorar el perfil sensorial de los niños. En este sentido, la música desempeña un papel integral y multifacético en su aprendizaje: no solo como contenido educativo o forma de expresión, sino también como una herramienta terapéutica y pedagógica que potencia sus fortalezas, aborda sus desafíos y promueve tanto su desarrollo global como su inclusión efectiva.

2.4 Diseño de interfaces accesibles para niños con SD

La literatura especializada identifica una serie de principios críticos para el diseño de interfaces accesibles para este grupo:

- **Simplicidad:** El diseño debe ser simple, intuitivo y fácil de usar, minimizando distracciones para hacer el contenido más atractivo y accesible [23].
- **Imágenes e iconos:** Deben ser simples, de tamaño grande y evitar representar texto dentro de las imágenes. Es recomendable mantener un estilo gráfico coherente para reducir la sobrecarga visual [23].
- **Color y contraste:** Utilizar colores definidos y vivos con alto contraste para mejorar la legibilidad y facilitar la diferenciación de elementos. Se debe evitar el uso excesivo de colores que puedan resultar molestos o causar fatiga visual [23].
- **Tipografía:** Debe ser clara, legible y de gran tamaño, con un alto contraste respecto al fondo. Se deben evitar tipografías decorativas o difíciles de leer [7]. Evitar uso de texto y comprensión lectora para enseñar a jugar o usar la aplicación [21].
- **Jerarquía visual:** Una estructura visual clara que guíe la atención y permita identificar fácilmente la información más relevante [20].
- **Instrucciones:** El contenido debe presentarse en un lenguaje simple, directo y familiar, con frases cortas adaptadas al nivel de comprensión del usuario [11].
- **Interacción táctil:** Los elementos interactivos deben ser lo suficientemente grandes como para facilitar la precisión, considerando las dificultades de motricidad fina que pueden presentar los usuarios [20].
- **Tolerancia al error:** La interfaz debe minimizar la posibilidad de errores y mitigar las consecuencias de acciones accidentales [10].
- **Retroalimentación:** La motivación constante es esencial. Es importante ofrecer retroalimentación inmediata y positiva que indique al usuario que está realizando correctamente las acciones [22].

Diseñar interfaces para niños con síndrome de Down no difiere significativamente de hacerlo para niños sin esta condición, especialmente en edades tempranas, donde no se requiere la lectura como habilidad principal. Ambos grupos —niños pequeños que aún no saben leer y niños con SD— comparten necesidades similares, como la simplicidad en el diseño, el soporte visual y auditivo, la retroalimentación clara e inmediata, elementos interactivos de gran tamaño y un adecuado espaciado entre componentes [24].

Las diferencias son más evidentes en niños mayores. Mientras los neurotípicos utilizan computadores principalmente para entretenimiento y comprenden conceptos abstractos o instrucciones escritas, aquellos con SD pueden requerir apoyos específicos. No obstante, para ambos grupos resulta fundamental una navegación intuitiva [25]. En lugar de depender únicamente de diseños naturalmente comprensibles —que no siempre son viables—, una alternativa efectiva es implementar guías que incrementen gradualmente la complejidad y sostengan el interés del usuario.

Pese a compartir una marcada preferencia por el aprendizaje visual, tanto los niños con autismo como aquellos con SD requieren principios de diseño que divergen. Mientras que en el autismo las aplicaciones aprovechan esta capacidad visual para crear sistemas altamente estructurados y predecibles -con énfasis en minimalismo, rutinas personalizadas y desarrollo de habilidades sociales mediante apoyos aumentativos- [27] [28], en el SD el enfoque visual se complementa con adaptaciones táctiles y motoras que compensen la hipotonía, memoria auditiva limitada y atención breve. Así, si bien ambos grupos se benefician de interfaces intuitivas con retroalimentación multisensorial, las aplicaciones para autismo priorizan la reducción de ambigüedades y el entrenamiento socioemocional, mientras que las dirigidas a SD enfatizan la concreción de actividades, la inmediatez de la retroalimentación y la simplificación de secuencias para superar desafíos motrices y cognitivos particulares.

Independientemente de la edad o condición, los principios de diseño previamente mencionados constituyen una base sólida y compartida. Estos lineamientos aseguran una experiencia más accesible, comprensible y motivadora para todos los niños, fortaleciendo el compromiso con una educación inclusiva.

2.5 Como realizar pruebas en niños con SD

Los métodos utilizados para validar la usabilidad en niños y personas con síndrome de Down suelen implicar la adaptación de técnicas estándar de evaluación, considerando sus características cognitivas, motoras y de comunicación. Por ejemplo, en [26] se adaptó el método de análisis detallado de video (DEVAN) específicamente para observar a niños con esta condición, lo que requirió modificar, añadir o eliminar ciertos indicadores de observación para ajustarse mejor a sus necesidades.

Además, se emplean métodos basados en pruebas con usuarios y observación directa, los cuales permiten recolectar datos objetivos como la tasa de éxito o fracaso, o la cantidad de errores [7] [30]. Sin embargo, señalamos que el tiempo de ejecución no es una métrica adecuada para esta población, ya que puede no reflejar correctamente su nivel de comprensión o destreza.

También se han utilizado técnicas como la exploración libre y la navegación guiada [29], entrevistas, cuestionarios adaptados [30], evaluaciones por parte de expertos, así como métodos basados en datos mediante pruebas comparativas [31]. En algunos estudios, como [22] y [29], se han realizado pruebas cognitivas o de desarrollo para perfilar mejor a los participantes antes de la evaluación.

2.6 Descripción de la aplicación Piano Colors

Piano Colors es una aplicación educativa diseñada específicamente para enseñar conceptos musicales básicos y habilidades para tocar piano a niños con síndrome de Down. Surgió como un proyecto de innovación tecnológica desarrollado por seis estudiantes de Ingeniería Civil Informática de la Universidad Técnica Federico Santa María durante el año 2024. La aplicación nació con el propósito de digitalizar y potenciar el método PianoUp [49], creado por el profesor de música Álvaro Acevedo, quien actuó como cliente real durante el desarrollo del proyecto.

El método PianoUp se basa en un sistema de asociación multisensorial que vincula cada nota musical con una figura geométrica y un color específico. El método se ilustra en la Figura 1. Por ejemplo, la nota Do de la segunda escala se representa con un cuadrado rojo; la nota Re de la tercera escala, con un círculo naranja; y la nota Mi de la cuarta escala, con un triángulo amarillo. Así, cada nota de cada escala tiene un color y una figura asociada. Este método requiere que los estudiantes recorten y peguen físicamente estas figuras en las teclas del piano. Piano Colors también mantiene este trabajo manual; sin embargo, evita la necesidad de imprimir diferentes partituras con las figuras incorporadas.



Figura 1. Método PianoUp

Una de las características más innovadoras de Piano Colors es su sistema de reconocimiento de audio en tiempo real. Mediante un plugin especializado [48], la aplicación es capaz de identificar las notas que el niño toca en un piano físico y mostrarlas en pantalla, asociadas a sus correspondientes figuras y colores. Esto permite una retroalimentación inmediata y una experiencia de aprendizaje más intuitiva. Además, la aplicación incluye un asistente virtual llamado Pía, un camaleón verde que guía al usuario mediante instrucciones de voz, haciendo que la interacción sea más accesible para niños con dificultades de lectura.

A continuación, se presenta la Figura 2, que muestra capturas de pantalla de la última versión de Piano Colors, presentada en la Feria de Software de 2024. Esta feria, organizada anualmente por la Universidad Técnica Federico Santa María, es un evento académico en el que los estudiantes de último año exponen proyectos innovadores de ingeniería informática frente a docentes, expertos del área y público general. Las imágenes ilustran algunos de los módulos y características principales de la aplicación que se describen en los siguientes párrafos, facilitando la comprensión de su estructura y funcionalidades.

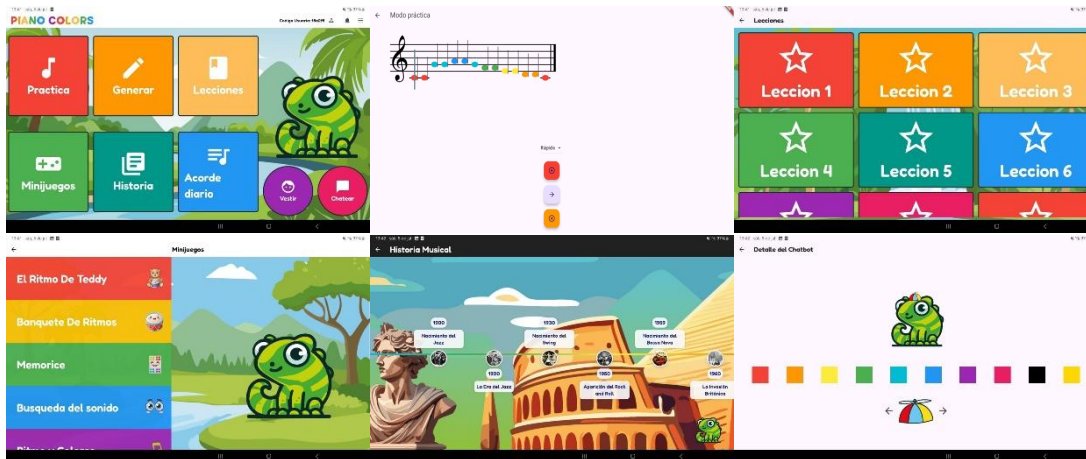


Figura 2. Última versión de Piano Colors presentada en la Feria de Software

La aplicación está estructurada en seis módulos principales, diseñados para cubrir diferentes aspectos del aprendizaje musical. El Modo Práctica permite a los estudiantes tocar canciones mediante el método PianoUp. El Generador de Canciones crea melodías procedurales basadas en escalas musicales, ofreciendo material de práctica ilimitado. Las 15 Lecciones digitalizan el contenido del cuadernillo PianoUp, llevando al estudiante desde conceptos básicos —como diferenciar sonido y silencio— hasta tocar acordes completos. Cada lección combina teoría interactiva con ejercicios prácticos y finaliza con un sistema de registro emocional que permite al niño expresar cómo se sintió durante la actividad.

Los 7 Minijuegos incorporan elementos lúdicos para reforzar conceptos musicales de manera divertida, con actividades como memorizar secuencias de sonidos o identificar ritmos. La sección Historia de la Música ofrece un recorrido interactivo por los hitos musicales más importantes desde 1900, utilizando pictogramas y narraciones auditivas para hacer el contenido accesible. Finalmente, el Acorde Diario se desbloquea al completar las lecciones y permite practicar aproximadamente 120 acordes del piano, con un acorde nuevo cada día.

Piano Colors representa un avance significativo en la integración de tecnología y educación musical inclusiva. Al digitalizar el método pedagógico PianoUp y trasladarlo a un entorno interactivo, sentó las bases de una herramienta con gran potencial para el aprendizaje autónomo de niños con síndrome de Down. Sin embargo, aunque en 2024 se realizaron pruebas con usuarios reales, estas no siguieron un proceso iterativo centrado en la mejora de la usabilidad, lo que dejó pendiente la evaluación y adaptación fina de sus interfaces. Esta investigación retoma y profundiza ese trabajo, enfocándose en optimizar la experiencia de usuario a partir de necesidades cognitivas y motrices específicas. Más que intervenir en toda la interfaz, se propone identificar y rediseñar aquellos componentes críticos que realmente determinan la accesibilidad, comprensión y autonomía dentro de la aplicación.



3 Metodología

3.1 Diseño Centrado en el Usuario (DCU)

El Diseño Centrado en el Usuario (DCU) es un enfoque metodológico que prioriza las necesidades, capacidades y contextos de los usuarios finales en cada etapa del desarrollo de un producto [ISO 9241-210]. En este proyecto, el DCU se aplicó mediante un proceso iterativo que involucró a niños con síndrome de Down como co-diseñadores, validando prototipos a través de pruebas de usabilidad. Esto permitió adaptar la interfaz de Piano Colors a sus características cognitivas, motoras y sensoriales, con el fin de garantizar accesibilidad y promover la autonomía en el aprendizaje musical.

3.2 Pruebas formativas

- **Objetivo:** Identificar problemas de usabilidad en la interfaz.
- **Metodología:** Evaluaciones con tres usuarios por iteración.
- **Criterios:** Si los resultados no cumplían con los estándares establecidos (por ejemplo, una tasa de éxito insuficiente o un alto número de intervenciones del tutor), se realizaba una nueva iteración de mejora. Solo una vez alcanzados los objetivos, la actividad se consideraba validada para pasar a la prueba sumativa.

3.3 Prueba Sumativa

- **Objetivo:** Validar la autonomía y la usabilidad global de la interfaz.
- **Metodología:** Evaluación cuantitativa final con diez usuarios, aplicando todas las actividades previamente validadas durante las pruebas formativas.
- **Criterios:** Se establecieron métricas específicas para confirmar el éxito de las mejoras iterativas realizadas.

3.4 Observación

La observación constituyó la técnica principal para recopilar datos cualitativos durante las pruebas. Previo consentimiento informado de los padres mediante autorización escrita, se realizaron grabaciones en video que permitieron registrar:

- **Comportamientos:** Confusión entre colores, gestos incorrectos, señales de aburrimiento o incompreensión.
- **Interacciones espontáneas:** Exploración libre de la interfaz por parte de los niños, sin guía.
- **Factores distractores:** Influencias externas como ruidos ambientales o elementos visuales que desviaban la atención.



3.5 Definición de mejora iterativa

El proceso de mejora iterativa se estructuró en ciclos de diseño–evaluación–ajuste, utilizando las pruebas descritas anteriormente. Cada iteración incluyó:

1. Identificación de problemas mediante pruebas formativas.
2. Implementación de ajustes en la interfaz (por ejemplo, modificación del tamaño de los botones o mejora de la retroalimentación visual).
3. Validación de los cambios en nuevas pruebas, hasta alcanzar los criterios de éxito predefinidos.

Cada ciclo permitió refinar progresivamente la aplicación antes de someterla a la evaluación final. Para garantizar la validez del proceso —tanto en pruebas formativas como en la sumativa—, se siguieron las recomendaciones de la guía de pruebas de usabilidad USATESTDOWN [30]. Por lo tanto, se definieron los siguientes requisitos para cada sesión de prueba:

- **Tarea:** Objetivo claro que el niño debía cumplir dentro de la interfaz.
- **Instrucción:** Transmitida por voz, con lenguaje simple y directo, entregada una sola vez antes de permitir que el niño ejecutara la tarea de manera autónoma.

Las pruebas se realizaron de forma individual en un entorno controlado, registrando métricas tanto objetivas como subjetivas. Cada niño contó con un máximo de 10 minutos para completar las actividades, aunque no se impuso un límite estricto por tarea. Considerando que los participantes tienden a tener periodos de atención breves, se evitó el diseño de tareas largas o complejas.

4 Mejora Iterativa

4.1 Participantes y Criterios de Éxito

Siguiendo el enfoque metodológico descrito en el capítulo anterior, se llevó a cabo la implementación del proceso de mejora iterativa con usuarios reales en la Fundación EDUDOWN. Las pruebas se realizaron en una sala de clases controlada (con *tablet*, piano, y computador para registro). Se establecieron dos métricas clave:

1. **Éxito en la tarea** (escala 0-1), definido en la Tabla 1:

| Definición | Valor |
|-----------------------------|-------|
| Prueba completada sin ayuda | 1 |
| Prueba completada con ayuda | 0,5 |
| Prueba no completada | 0 |

Tabla 1. Definición de valores de éxito



2. Intervenciones de tutores:

Se registró como intervención cuando el tutor:

- Tomaba la mano del niño para interactuar con los dispositivos.
- Señalaba exactamente dónde tocar.
- Actuaba si el niño abandonaba la actividad (*contabilizado una sola vez*).

Un fenómeno frecuente, particularmente con niños más pequeños, es la repetición constante de instrucciones por parte de los padres. Aunque este comportamiento escapa al control del estudio y podría considerarse casi habitual, no se clasifica como intervención según los criterios establecidos.

En la Tabla 2 se resumen las características principales de las pruebas realizadas, incluyendo el rango etario de los participantes, los criterios de éxito y los objetivos asociados a cada fase. Como se detalla en dicha tabla, los participantes fueron niños entre 7 y 12 años, ya que, según Devan [26], a partir de los 7 u 8 años los niños comienzan a desarrollar habilidades cognitivas que les permiten distinguir conceptos básicos de usabilidad. Cabe aclarar que, si bien el rango etario se mantuvo constante, los participantes no fueron los mismos en cada fase, debido a las dinámicas de asistencia en la fundación: los niños suelen participar solo en talleres breves de una o dos horas, y no todos acuden con regularidad. Esto imposibilita realizar pruebas continuas con los mismos individuos, a diferencia de estudiantes mayores que asisten diariamente.

| FASE | PARTICIPANTES | OBJETIVO | CRITERIO DE ÉXITO |
|------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| Prueba Formativa | 3 niños (7 – 12 años) | Identificar errores de usabilidad | -Mejora en tasa de éxito: $\geq 30\%$ vs. Inicial. -Reducción de intervenciones: $\geq 50\%$ vs. Inicial. |
| Prueba Sumativa | 10 niños (7-12 años) | Medir autonomía en tareas musicales | - Tasa de éxito promedio: $\geq 80\%$. - Intervenciones promedio: ≤ 0.5 por sesión. |

Tabla 2. Métricas establecidas para las fases de evaluación

Los criterios de validación establecidos - una tasa de éxito $\geq 80\%$ y un promedio de intervenciones ≤ 0.5 por sesión - se han definido para medir cuantitativamente el cumplimiento de los objetivos planteados. La exigencia de una mejora mínima del 30% en la tasa de éxito entre iteraciones permitirá verificar que los ajustes en la interfaz están efectivamente resolviendo las barreras iniciales identificadas, adaptando la interfaz a las necesidades cognitivas y motrices de los usuarios. Paralelamente, el criterio de reducción de intervenciones servirá como indicador clave para demostrar el avance hacia la autonomía en el uso de la aplicación. Estos parámetros han sido establecidos como metas alcanzables basándose en estándares de usabilidad para poblaciones con necesidades especiales, y permitirán objetivamente validar que Piano Colors logra su propósito de ser una herramienta accesible, funcional y promotora de independencia en el aprendizaje musical.

4.2 Interfaces seleccionadas y justificación

Dado que Piano Colors cuenta con múltiples módulos y funcionalidades, no era factible evaluar la totalidad de la aplicación en una sola investigación. Por ello, se seleccionaron tres interfaces clave, que representan de forma amplia las interacciones más relevantes del sistema. Esta selección se justifica por su cobertura transversal de elementos compartidos entre distintos módulos como lecciones, minijuegos y modos de práctica.

1. **Modo Práctica:** Es el núcleo de la aplicación y refleja el objetivo principal del método PianoUp. En otras funcionalidades como algunas lecciones, minijuegos, acorde diario y generador de canciones se ocupa esta interfaz.
 - *Tarea:* Reducir las notas en la partitura para facilitar el aprendizaje.
 - *Instrucción:* "Mira la partitura en pantalla y toca la nota del mismo color en el piano."
2. **Minijuego 1 (Reconocimiento de instrumentos):** Evalúa el gesto Tap, considerado el más frecuente y exitoso según [11]. Este gesto es esencial tanto para jugar como para navegar por la interfaz completa, y es ampliamente utilizado en las lecciones y en la exploración general de la aplicación.
 - *Tarea:* Identificar instrumentos musicales.
 - *Instrucción:* "Selecciona el instrumento que se está tocando."
3. **Minijuego 2 (Ritmo y colores):** Evalúa el gesto Slide, el segundo más común y con alto nivel de éxito. Este gesto es especialmente relevante en los ejercicios prácticos de las lecciones musicales, donde los niños deben seguir secuencias de ritmo o color.
 - *Tarea:* Seguir el ritmo o patrón de colores de una canción.
 - *Instrucción:* "Desliza la figura según el ritmo o color de la canción."

Tanto el Minijuego 1 como el Minijuego 2 permiten validar componentes compartidos con otras partes de la aplicación. Por ejemplo, ambos requieren una sección de instrucción previa (equivalente a la teoría en las lecciones) y una fase de ejecución autónoma (equivalente a los ejercicios prácticos). Por lo tanto, los resultados obtenidos en estas interfaces pueden extrapolarse a otras funcionalidades, permitiendo sentar las bases para futuras mejoras integrales en el sistema.

4.3 Mejoras del modo práctica

La Figura 3 muestra la interfaz modo práctica inicial, que consistía en una imagen estática generada al ingresar a la actividad, con un indicador gris que marcaba la posición en la canción y cuatro botones: un desplegable para ajustar la velocidad de reconocimiento de notas, un botón rojo para activar/desactivar la detección de audio, un botón flecha derecha para avanzar manualmente sin detección, y un botón naranja que simulaba errores haciendo parpadear la nota correspondiente.

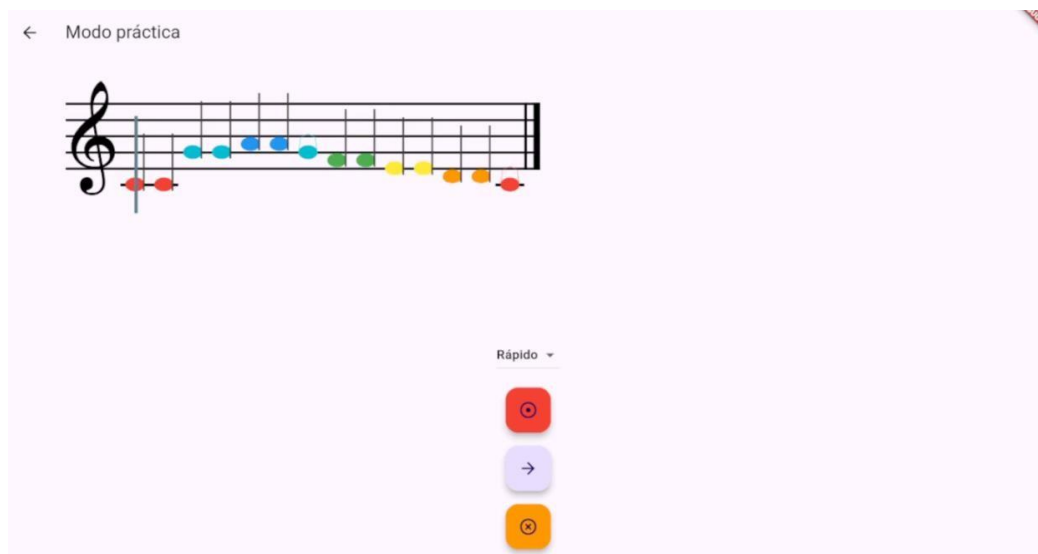


Figura 3. Modo práctica inicial

La Tabla 3 muestra los resultados de la prueba formativa inicial del modo práctica, junto con hallazgos clave a tener en consideración para la siguiente iteración.

| Usuario | Éxito | Intervenciones | Observación |
|---------|-------|----------------|---|
| 1 | 0,5 | 6 | Tamaño de las notas muy pequeño. Confusión entre colores azul y celeste. |
| 2 | 0,5 | ≥10 | Confusión entre naranja y amarillo. La cantidad excesiva de notas en pantalla genera desorientación, requiriendo asistencia constante para identificar el color correcto. |
| 3 | 0,5 | 6 | Tamaño insuficiente de las notas. La proximidad entre ellas dificulta distinguir cuál debe tocarse a continuación. |

Tabla 3. Resultados de la prueba formativa inicial del modo práctica

El rediseño iterativo implicó rehacer esta sección, ya que inicialmente dependía de un plugin externo. Este proceso permitió crear un diseño más funcional que facilitara la identificación clara de las notas a tocar en cada momento, redujera la cantidad de notas en pantalla y eliminara la dependencia de botones. A partir de los resultados de la prueba inicial y con el objetivo de mejorar la experiencia, se rediseñó el modo práctica (Figura 4), aumentando el tamaño de las notas, implementando una visualización gradual con velocidad constante en su aparición e incorporando un marcador visual que indicaba el momento exacto para tocar. Además, se eliminaron botones redundantes, se habilitó el inicio automático de la canción, se añadió retroalimentación visual y auditiva al acertar y se incluyó un tutorial introductorio para optimizar la interacción del usuario.

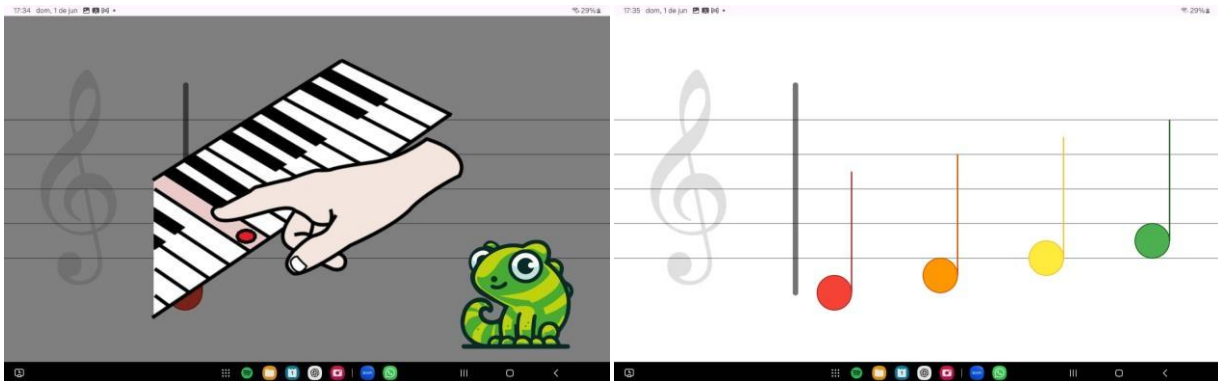


Figura 4. Modo práctica iteración 2

La Tabla 4 muestra los resultados de la segunda prueba formativa del modo práctica, junto con hallazgos menores a tener en consideración para la siguiente iteración.

| Usuario | Éxito | Interrupciones | Observación |
|---------|-------|----------------|--|
| 1 | 1 | 1 | Presiona antes de tiempo. Confunde celeste y azul. |
| 2 | 1 | 0 | Toca dos veces las notas. |
| 3 | 1 | 0 | Presiona antes de tiempo. |

Tabla 4. Resultados de la segunda prueba formativa del modo práctica

Se realizaron ajustes menores como la optimización de colores (sustituyendo el celeste por un tono más claro y oscureciendo el azul) y la eliminación del sonido de retroalimentación durante la ejecución musical mejoraron aún más la usabilidad, consolidando un diseño intuitivo con una curva de aprendizaje natural.

4.4 Mejoras del minijuego 1

En la Figura 5 se muestra el minijuego inicial, que constaba de tres fases: una introducción al gesto Tap, una etapa de reconocimiento de cuatro instrumentos (donde cada uno cambiaba de color, reproducía su sonido y una animación al ser presionado) y un juego principal en el que el niño escuchaba un fragmento musical y debía identificar los instrumentos correctos (hasta dos posibles). En caso de error, el borde del instrumento se volvía gris; al acertar, se desbloqueaba el botón Continuar, repitiéndose el proceso hasta completar la secuencia y mostrar una pantalla de felicitaciones.



Figura 5. Minijuego 1 inicial

La Tabla 5 muestra los resultados de la prueba formativa inicial del minijuego 1, junto con hallazgos clave a tener en consideración para la siguiente iteración.

| Usuario | Éxito | Intervenciones | Observación |
|---------|-------|----------------|---|
| 1 | 0,5 | 5 | Dificultad para distinguir dos sonidos en un mismo audio (selección por descarte). El borde gris en errores no era perceptible. Olvidaba presionar el botón de "Canción" y "Continuar" tras el primer intento. |
| 2 | 0,5 | 5 | Confusión al diferenciar dos sonidos simultáneos (selección por descarte). Presionaba el botón "Canción" cada vez que intentaba adivinar un instrumento diferente. Olvidaba presionar el botón de "Canción" tras el primer intento. |
| 3 | 0 | 8 | Dificultad para distinguir dos sonidos en un mismo audio (selección por descarte). El juego no captó su interés. |

Tabla 5. Resultados prueba formativa inicial del minijuego 1

El rediseño iterativo abordó problemas críticos, como simplificar el tutorial del juego para hacer más intuitiva la progresión, reducir interacciones innecesarias y potenciar el aspecto lúdico de la experiencia. Para lograrlo, se simplificó radicalmente la mecánica (Figura 6): se eliminaron los audios múltiples, utilizando un único instrumento por ronda, y se automatizaron funciones como la reproducción de canciones y el botón "Continuar". Además, se incorporaron imágenes de animales animados tocando los instrumentos para reforzar la asociación visual y se introdujo una narrativa de "concurso de talentos" en la que el niño asumía el rol de juez. La retroalimentación se optimizó con mensajes positivos como "Intentálo de nuevo" en caso de error, y se mejoró la legibilidad mediante pictogramas más grandes con bordes de colores.

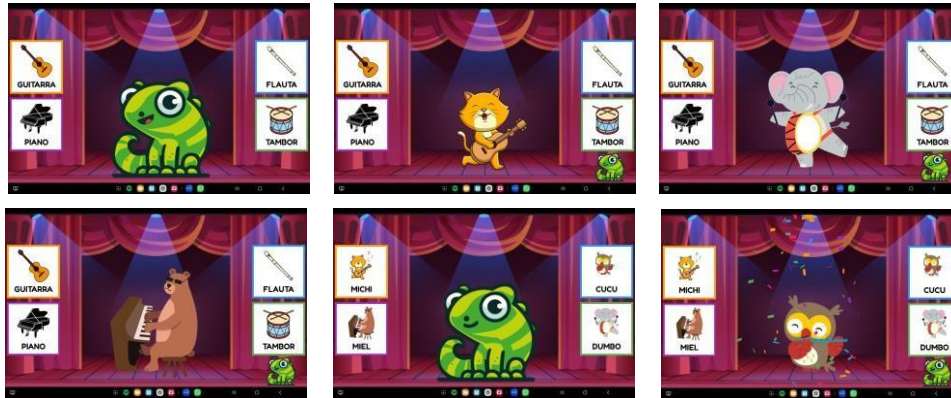


Figura 6. Minijuego 1 en segunda prueba

La Tabla 6 muestra los resultados de la segunda prueba formativa del minijuego 1, junto con hallazgos menores a tener en consideración para la siguiente iteración.

| Usuario | Éxito | Interrupciones | Observación |
|---------|-------|----------------|---|
| 1 | 1 | 2 | Requirió repetición de instrucciones sobre qué instrumento se estaba tocando. En ocasiones, presionaba repetidamente el pictograma para acertar. |
| 2 | 1 | 0 | No tuvo problemas. |
| 3 | 0,5 | 2 | Los primeros dos sonidos requirieron ayuda para fomentar tocar los instrumentos, veía los instrumentos correctos, pero no los presionaba (posible timidez al equivocarse). Posteriormente, logró realizarlo sin asistencia. |

Tabla 6. Resultados segunda prueba formativa del minijuego 1

Para perfeccionar la experiencia, se optimizó la secuencia de interacción: mientras antes el guía virtual preguntaba "¿Qué instrumento está tocando?" antes del sonido (generando repeticiones), ahora primero anuncia "Escuchemos al participante X", reproduce el audio y luego formula la pregunta. Este cambio —sutil pero estratégico— hizo la tarea más intuitiva para los niños.

Adicionalmente, como se muestra en la Figura 7, se implementó un sistema dinámico de pictogramas que aparecen únicamente cuando es necesario interactuar con ellos, a diferencia de la versión anterior donde permanecían visibles durante toda la actividad. Asimismo, el gesto de ayuda se activa automáticamente en el primer ejercicio, al momento de explicar la actividad; posteriormente, cuando el niño debe interactuar de forma autónoma, se mantiene el tiempo de espera original para la ayuda (aproximadamente 20 segundos), lo que contribuye a mejorar el foco atencional.



Figura 7. Ajustes ligeros del minijuego 1 luego de superar el criterio de éxito de la prueba formativa

Complementariamente, se añadió una cortina negra para resaltar los botones clave, se enriquecieron los pictogramas visibles mediante bordes, sombras y efectos de elevación, y se ajustó la opacidad del fondo (10 %) con el fin de optimizar el contraste durante las transiciones. En conjunto, estos ajustes mejoraron la fluidez y la claridad del juego sin alterar su esencia fundamental.

4.5 Mejoras del minijuego 2

En la Figura 8 se muestra la versión inicial del minijuego, que constaba de tres fases: una introducción al gesto Slide, una etapa de reconocimiento de velocidades (asociando figuras rojas, amarillas y verdes a ritmos lento, medio y rápido, respectivamente, con melodías correspondientes) y un juego principal donde el niño debía arrastrar la figura que coincidiera con el ritmo escuchado. Al acertar, recibía retroalimentación visual (confetti) y auditivo (campana y mensaje de voz), mientras que los errores no tenían retroalimentación específica. Al completar la secuencia, se mostraba una pantalla de felicitaciones.

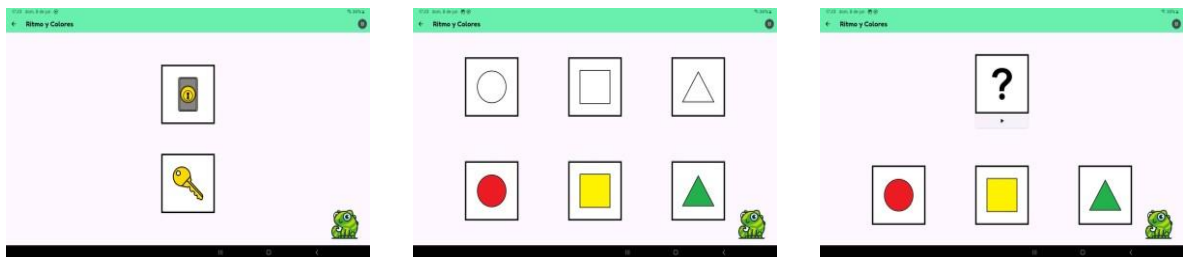


Figura 8. Minijuego 2 inicial

La Tabla 7 muestra los resultados de la prueba formativa inicial del minijuego 2, junto con hallazgos clave a tener en consideración para la siguiente iteración.

| Usuario | Éxito | Intervenciones | Observación |
|---------|-------|----------------|---|
| 1 | 0,5 | 4 | No presionaba el botón de "play". Objetivo poco claro (selección por descarte o ayuda directa del tutor). |
| 2 | 0,5 | 5 | Botón de "play" demasiado pequeño. Reproducía el audio repetidamente al intentar deslizar figuras. Frustración por falta de claridad y diversión. |
| 3 | 0,5 | 5 | Jugó por descarte. No encontró el juego atractivo. |

Tabla 7. Resultados prueba formativa inicial del minijuego 2

El rediseño iterativo abordó tres desafíos clave: reducir la cantidad de elementos que requerían deslizamiento, facilitar la comprensión del concepto mediante pistas visuales claras y reforzar el carácter lúdico de la experiencia. Como resultado, el juego evolucionó hacia una narrativa envolvente (Figura 9) donde el jugador ayuda a un "ratón robando queso", incorporando puertas coloridas y un sistema de retroalimentación intuitivo mediante una llave que cambiaba de tonalidad en el borde de su pictograma (rojo/amarillo/verde) para señalar las respuestas correctas. Se optimizó la accesibilidad eliminando la dependencia de audios y priorizando el código de colores, mientras que un tutorial animado demostraba claramente el gesto de *Slide*. La experiencia se enriqueció con retroalimentación constante a través de efectos vocales y visuales, complementado con la reproducción automática de sonidos y fondos dinámicos que mejoraron significativamente la fluidez de interacción.

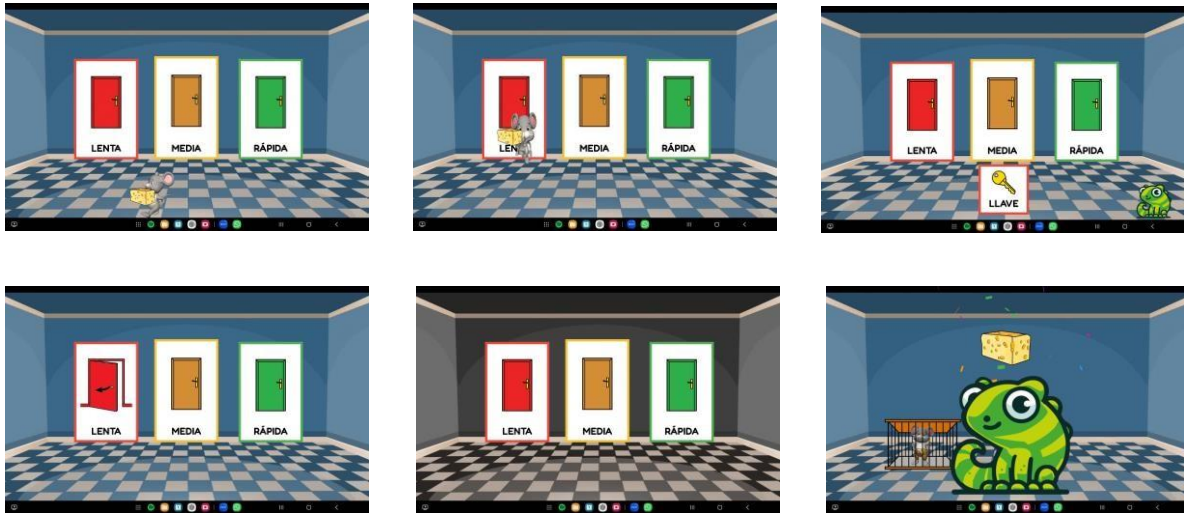


Figura 9. Minijuego 2 en segunda prueba

La Tabla 8 muestra los resultados de la segunda prueba formativa del minijuego 2, junto con hallazgos menores a tener en consideración para la siguiente iteración.

| Usuario | Éxito | Intervenciones | Observación |
|---------|-------|----------------|---|
| 1 | 1 | 1 | En una ocasión confundió el color amarillo de la llave con la puerta correcta amarilla. |
| 2 | 1 | 0 | No presentó dificultades |
| 3 | 1 | 2 | Inicialmente conocía la respuesta, pero dudaba en realizar la acción |

Tabla 8. Resultados segunda prueba formativa del minijuego 2

Como se observa en la Figura 10, en la versión final del Minijuego 2 se implementaron mejoras visuales y temporales que optimizan la experiencia sin modificar la mecánica central. La llave, al igual que el borde de las puertas, cambia de color según la opción correcta, reforzando la asociación visual. Además, la animación tutorial del gesto *Slide* fue reprogramada para aparecer inmediatamente después de la primera canción como guía inicial, mientras que en las canciones posteriores se mantuvo el retraso original de 20 segundos, promoviendo una transición gradual hacia la autonomía. También se redujo la opacidad del fondo en un 10 % para mejorar el contraste, se uniformaron las alturas de los pictogramas de las puertas y se aplicó únicamente a la llave un efecto de elevación con bordes negros para aumentar su visibilidad como elemento interactivo. Estos ajustes, enfocados en jerarquía visual y retroalimentación inmediata, fortalecieron la usabilidad del minijuego sin alterar su esencia.

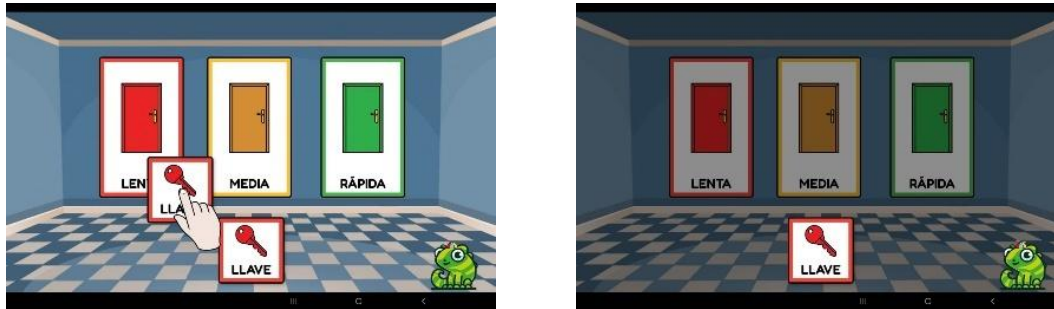


Figura 10. Ajustes ligeros del minijuego 2 luego de superar el criterio de éxito de la prueba formativa

4.6 Prueba Sumativa

En la evaluación final con 10 participantes (para más detalle revisar la tabla A.2 del Anexo), se consolidaron las mejoras de las iteraciones previas, obteniendo altas tasas de éxito y reducción significativa de intervenciones (Tabla 9). Las sesiones duraron ~10 minutos por niño, iniciando con el Minijuego 2 (el más atractivo en pruebas formativas).

| Actividad | Tasa de Éxito | Intervenciones Promedio | Usuarios con Éxito Total |
|---------------|---------------|-------------------------|--------------------------|
| Modo Práctica | 90% | 0.5 | 8/10 |
| Minijuego 1 | 95% | 0.1 | 9/10 |
| Minijuego 2 | 90% | 0.4 | 8/10 |

Tabla 9. Resultados de prueba sumativa

4.7 Discusión

En la Figura 11 se observa la progresión de la tasa de éxito promedio por actividad. Las pruebas formativas mostraron una mejora igual o superior al 40 % respecto a la evaluación inicial, manteniéndose este avance en la prueba sumativa. Destaca el minijuego 1, que alcanzó una mejora del 61,7 % en la prueba final, mientras que el promedio general de éxito en la evaluación sumativa fue del 91,7 % (90 % en modo práctica, 95 % en minijuego 1 y 90 % en minijuego 2).

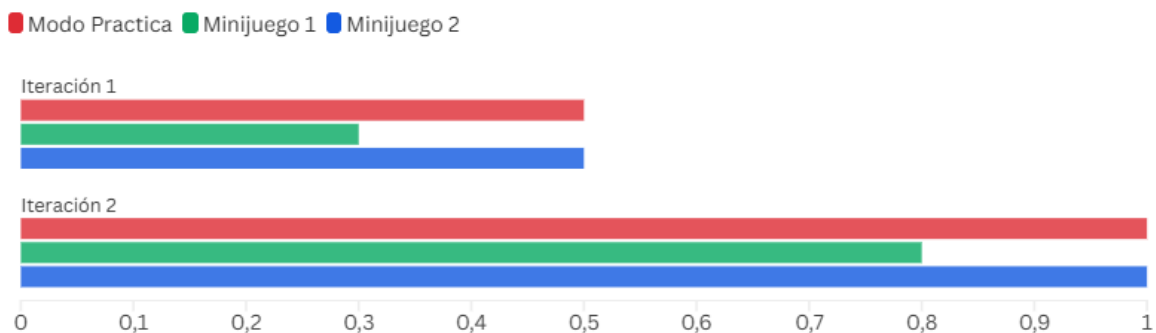


Figura 11. Tasa de éxito promedio en iteración 1 vs iteración 2

La Figura 12 refleja la reducción en las intervenciones parentales durante las actividades. Las pruebas formativas lograron disminuciones mayores al 75 % frente a la iteración inicial, tendencia que se mantuvo en la prueba final. El minijuego 1 logró una reducción del 98,3 % en las intervenciones, mientras que el modo práctica —que inicialmente registró un promedio de 7,3— descendió a 0,5. En conjunto, la prueba sumativa presentó un promedio de 0,5 intervenciones por sesión.

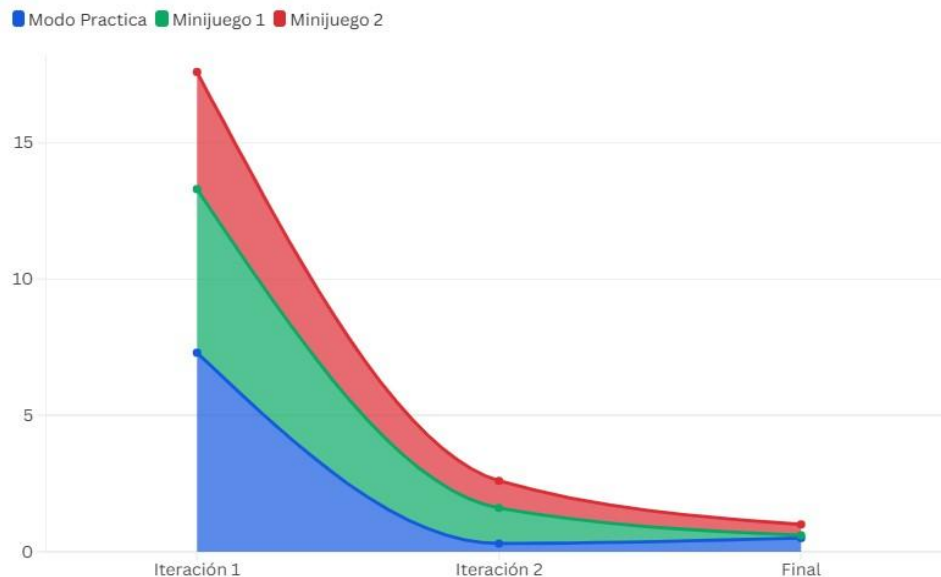


Figura 12. Tasa de interrupciones promedio a lo largo de las iteraciones

Durante la prueba final no se identificaron brechas de accesibilidad significativas, aunque persistieron dos situaciones particulares. En el modo práctica, algunos niños confundieron los colores celeste y azul, posiblemente debido al material físico utilizado (cartulina metalizada), cuyos tonos variaban según el ángulo de visión. Además, en los minijuegos, un niño respondía correctamente señalando sin interactuar, mientras que otro se distrajo con elementos externos, lo que sugiere posibles ajustes en el diseño para mantener la atención. Los datos revelaron una mejora clara en el desempeño, tanto por el aumento de aciertos como por la reducción de errores, especialmente tras la segunda iteración, donde los resultados se mantuvieron o mejoraron ligeramente. Esto se debió a que, para entonces, ya se habían corregido la mayoría de los problemas de accesibilidad, y los cambios posteriores se limitaron a ajustes visuales menores. Sin embargo, estas mejoras, aunque sutiles, fueron clave para que los niños identificaran con mayor claridad los elementos interactivos.

Los resultados inesperados, particularmente en la prueba final, no estuvieron directamente relacionados con la actividad en sí, sino con la forma en que el niño interactuaba con la tecnología. Por ejemplo, uno de los participantes se resistía a usar la aplicación e incentivaba a que otra persona lo hiciera por él, un comportamiento que, según su padre, ya era habitual en otros contextos, como al poner su huella dactilar en el médico, donde insistía en que fuera el padre quien lo hiciera. Otro caso recurrente fue la distracción, especialmente en niños más pequeños, causada por elementos externos del entorno de prueba, como la pantalla del computador que proyectaba lo mismo que la *tablet* (debido a la grabación de la interacción), a pesar de no estar frente a ellos, o incluso el piano físico, que atraía su atención mientras realizaban actividades en la *tablet*. Estos comportamientos variaron entre niños, influenciados también por la actitud de sus padres y el nivel de acceso a la tecnología en el hogar, el cual difiere según cuánto acceso se les ha permitido desde una edad temprana.

Entre los factores que potencialmente pudieron sesgar los resultados, destacan principalmente variables ambientales difíciles de controlar durante las sesiones de prueba. Se observó que diversos estímulos externos afectaban la concentración de los participantes: ruidos ambientales del recinto, objetos personales que llevaban

consigo (juguetes o pertenencias en sus mochilas que demandaban su atención), e incluso elementos del espacio físico como un espejo presente en una de las salas utilizadas. Estas distracciones ocasionales introdujeron variabilidad en las condiciones de evaluación.

Una mejora metodológica importante para futuras réplicas del estudio sería incorporar una evaluación previa del nivel de familiarización tecnológica de los participantes. Durante la implementación actual, se evidenció que la edad cronológica no necesariamente correlacionaba con la competencia digital —como muestra el caso contrastante entre una niña pequeña con acceso regular a *tablets* que mostró buen desempeño, frente a un niño mayor con aparentemente menor exposición tecnológica, que presentó dificultades significativas, especialmente con gestos como el *Slide*.

Los resultados obtenidos encuentran sustento teórico en tres fuentes principales: (1) los estudios sobre efectividad de gestos [11], que demostraron ser cruciales para las actividades implementadas —los niños no presentaban dificultades con la ejecución del gesto en sí, sino más bien con comprender su propósito—; (2) la guía de usabilidad para las pruebas [30], que estandarizó el proceso evaluativo y evitó la necesidad de una tercera prueba formativa, destacándose especialmente su recomendación de proporcionar una única instrucción clara antes de cada prueba, estrategia que resultó vital considerando la limitada capacidad de atención sostenida en los participantes; y (3) los principios de diseño accesible mencionados en el marco teórico (tamaño adecuado de pictogramas, uso de mayúsculas, contraste cromático, etc.), todos esenciales para garantizar la usabilidad del sistema.

5 Conclusiones

El proyecto logró satisfacer tanto el objetivo general como los específicos: la interfaz rediseñada demostró ser efectiva para hacer el aprendizaje musical accesible y autónomo en niños con síndrome de Down (SD), superando el estándar de usabilidad del 80 % para poblaciones con necesidades especiales. Alcanzó un 91,7 % de éxito en tareas, con solo 0,5 intervenciones adultas promedio. En detalle: (1) la adaptación de la UI redujo problemas de usabilidad con mejoras del 40–61,7 % tras iteraciones; (2) las intervenciones de adultos disminuyeron un 50 % en pruebas formativas; (3) la accesibilidad se validó mediante 16 pruebas con usuarios reales (7–12 años); y (4) la autonomía se consolidó con herramientas como el efecto de cortina oscura, la ocultación estratégica de elementos y las guías visuales de gestos, que resultaron críticas para optimizar la interacción.

Este trabajo establece un precedente relevante en dos ámbitos: (1) la integración de tecnología musical adaptada para niños con SD, demostrando que herramientas bien diseñadas pueden simplificar conceptos abstractos como reconocer las notas o la duración de estas; y (2) la creación de un modelo de usabilidad aplicable a otras aplicaciones educativas, con principios de diseño inclusivo validados empíricamente (minimalismo visual, retroalimentación multisensorial).

A pesar de los resultados positivos, el estudio identificó una limitación persistente: la confusión entre los colores azul y celeste en las teclas del piano, derivada de la metodología PianoUp adoptada. Para abordar esto sin modificar el enfoque original, se propone explorar paletas alternativas de colores o incorporar símbolos diferenciadores (como texturas o bordes), manteniendo así la esencia pedagógica del método mientras se mejora la accesibilidad visual. Esta solución permitiría resolver un problema menor que, aunque no comprometió los resultados globales, representa una oportunidad para optimizar la experiencia de usuarios con dificultades en la percepción cromática.

Los hallazgos de este estudio ofrecen importantes implicaciones prácticas para el diseño de aplicaciones educativas dirigidas a niños con SD, destacando tres aspectos fundamentales. En primer lugar, el diseño de interacción debe seguir un principio de minimalismo visual, mostrando solo los elementos esenciales y utilizando ayudas visuales progresivas que demuestren claramente las acciones requeridas, junto con instrucciones breves y segmentadas. En segundo lugar, los elementos de diseño deben garantizar accesibilidad mediante el uso de pictogramas estandarizados como ARASAAC, componentes interactivos con un tamaño



mínimo del 10 % de la altura de pantalla, bordes bien definidos, alto contraste cromático y una clara jerarquía visual apoyada por técnicas como la cortina negra. Finalmente, el factor lúdico resulta crucial para mantener la motivación, requiriendo la incorporación de elementos dinámicos que capturen y sostengan la atención, junto con retroalimentación inmediata y motivadora. Estas directrices, validadas empíricamente, no solo son aplicables al desarrollo de herramientas musicales, sino que también pueden extenderse a otros dominios educativos, estableciendo un marco valioso para la creación de tecnologías inclusivas efectivas.

Las implicaciones del proyecto trascienden el piano como instrumento único, abriendo posibilidades para adaptar la metodología a otros instrumentos como la flauta, la guitarra o el metalófono. Esta expansión representa una dirección prometedora para futuras investigaciones en tecnología educativa musical dirigida a niños con SD. Como próximos pasos, se plantea enriquecer la aplicación incorporando figuras geométricas para representar nuevas escalas (triángulos, cuadrados), optimizar el contraste cromático en entornos domésticos reales y extender el enfoque a dichos instrumentos, ampliando así su alcance e impacto pedagógico.

En el transcurso de esta investigación, los resultados han demostrado que el diseño iterativo centrado en la accesibilidad y la experiencia del usuario es fundamental para crear herramientas tecnológicas efectivas para niños con síndrome de Down. Los patrones de mejora observados, respaldados por ajustes en la interfaz y la interacción, confirman la importancia de principios como el minimalismo visual, la retroalimentación gestual y el componente lúdico. Sin embargo, este estudio también reveló áreas que merecen mayor exploración: ¿Cómo adaptar estos hallazgos a otros instrumentos musicales o dominios de aprendizaje? ¿Qué estrategias pueden desarrollarse para mitigar el impacto de distractores ambientales en entornos no controlados? ¿De qué manera el nivel previo de exposición a la tecnología afecta la curva de aprendizaje? Estas preguntas, junto con los avances logrados, representan un paso significativo en el diseño de tecnologías inclusivas, pero también destacan la importancia de continuar refinando metodologías que consideren tanto las capacidades como los contextos diversos de los usuarios finales.

6 Referencias

- [1] Universidad de los Andes (UANDES), "En Chile nacen en promedio 27 niños cada mil con síndrome de Down," 2025. [Online]. Available: <https://www.uandes.cl/noticias/en-chile-nacen-en-promedio-27-ninos-cada-mil-con-sindrome-de-down/>
- [2] L. M. Enríquez, "La música como herramienta inclusiva en el síndrome de Down. Una propuesta de intervención para Educación Infantil," B.S. thesis, Facultad de Educación, Universidad de Valladolid, Palencia, España, 2020.
- [3] V. C. Arce, V. A. Castellanos, and E. Flores-Arias, "Impacto de la musicoterapia en la estimulación sensorial, social, cognitiva y motriz en niños, con déficit neurológico en México," *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 27, no. 2, pp. 34–39, 2015.
- [4] G. M. Miranda-Paredes, M. Sallema-Torres, and Z. J. Suárez-Córdoba, "Actividades recreativas para el desarrollo motriz de niños con Síndrome de Down," *Revista INVECOM: Estudios transdisciplinarios en comunicación y sociedad*, vol. 4, no. 1, pp. 1–15, 2024.
- [5] M. A. Meza-Salazar and W. L. Roldan-Baluis, "La tecnología y su impacto en la educación musical en niños," *Horizontes. Revista de Investigación en Ciencias de la Educación*, vol. 8, no. 35, pp. 2519–2532, Oct.-Dec. 2024, doi: 10.33996/revistahorizontes.v8i35.885.
- [6] S. Hamburg et al., "Cómo evaluar las capacidades cognitivas y adaptativas en los adultos con síndrome de Down: una revisión sistemática," *Journal of Developmental Disorders*, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s11689-019-9279-9>
- [7] M. A. Herrera Villalón, "Experiencia de usuario en personas con síndrome de Down," Informe Final de Proyecto, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Informática, Sept. 2016.
- [8] H. Memisevic and A. Macak, "Fine motor skills in children with Down syndrome," *Specijalna edukacija i rehabilitacija*, vol. 13, no. 4, pp. 365-377, 2014, doi: 10.5937/specedreh13-7465.
- [9] L. Díaz-Galindo et al., "Alteraciones auditivas y desarrollo del lenguaje en niños con síndrome de Down: revisión sistemática de la literatura," *Acta Pediatr Esp.*, vol. 76, no. 1-2, pp. e1-e8, 2018.
- [10] M. I. Tobar Martínez, "Experiencia de usuario en personas con síndrome de Down," Informe Final de Proyecto, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Informática, Dic. 2017.
- [11] J. Martín-Gutierrez and M. del Río, "Analysing Touchscreen Gestures: A Study Based on Individuals with Down Syndrome Centred on Design for All," *Sensors*, vol. 21, p. 1328, Feb. 2021.
- [12] J. Muñoz-Ortiz et al., "Prevalence of ophthalmological manifestations in pediatric and adolescent populations with Down syndrome: a systematic review of the literature," *Systematic Reviews*, vol. 11, no. 1, p. 75, Apr. 2022, doi: 10.1186/s13643-022-01940-5.
- [13] D. Martín-Pinillos Brito, "Estudio sobre la interacción de niños con síndrome de Down con materiales educativos digitales utilizando la técnica de Eyetracking," B.S. thesis, Univ. de La Laguna, 2016. [Online]. Available: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/1940>



- [14]C. Arranz Barcenilla, "Tecnologías para el aprendizaje sostenible en individuos con síndrome de Down: exploración de herramientas y estrategias pedagógicas," Ph.D. dissertation, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, Univ. de Burgos, 2024, doi: 10.36443/10259/9164.
- [15]D. Pareja Prieto, "Gamificación & Síndrome de Down," B.S. thesis, Grado en Pedagogía, Facultad de Ciencias de la Educación, Univ. de Málaga, 2015.
- [16]C. Venegas et al., "Educational platform for children with Down syndrome manageable by the educator," in Proc. World Congr. Eng. Comput. Sci. (WCECS), San Francisco, CA, USA, Oct. 2016, vol. I.
- [17]E. A. Abril Ruiz and R. S. Abril Ruiz, "Ecosistema digital para la estimulación multisensorial en niños con síndrome de Down," Rev. Publicando, vol. 10, no. 40, pp. 1–13, 2023, doi: 10.51528/rp.vol10.id2398.
- [18]A. M. Khan, "An investigation into how mobile apps can support increased independence for people with Down's Syndrome," M.S. thesis, Univ. of Strathclyde, 2023.
- [19]S. A. Hernández Sandoval, "Diseño y validación de un recurso educativo digital para el desarrollo de las competencias matemáticas en la vida de niños y niñas con Síndrome de Down," M.S. thesis, Univ. del Norte, 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10584/5870>
- [20]C. González González et al., "Diseño e implementación de interfaces accesibles para acercar las matemáticas a niños con síndrome de Down," in Current Developments in Technology-Assisted Education, Jan. 2006, pp. 1090–1095.
- [21]M. Grané and L. Crescenzi-Lanna, "Improving the interaction design of apps for children with special educational needs," Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, vol. 30, pp. 139–164, Mar. 2021.
- [22]M. Y. Cortés et al., "Study of the usability in applications used by children with Down Syndrome," in 2013 8th Computing Colombian Conference (8CCC), Armenia, Colombia, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ColombianCC.2013.6637513.
- [23]C. Rodríguez Gallego, "Estudio del diseño gráfico en los materiales didácticos de lectoescritura para niños con discapacidad intelectual: Propuesta de adaptación de Material.io al método global," B.S. thesis, Grado en Diseño Integral y Gestión de la Imagen, [Universidad], 2024.
- [24]S. Chiasson and C. Gutwin, "Design principles for children's technology," Interfaces, vol. 7, 2005.
- [25]H. Latiff, R. Razali, and F. Ismail, "User interface design guidelines for children mobile learning applications," International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), vol. 8, no. 3, pp. 3311–3319, Sep. 2019, doi: 10.35940/ijrte.C5434.098319.
- [26]I. Macedo and D. G. Trevisan, "A method to evaluate disabled user interaction: A case study with Down syndrome children," in Universal Access in Human-Computer Interaction. Design Methods, Tools, and Interaction Techniques for eInclusion, C. Stephanidis and M. Antona, Eds., vol. 8009, Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-39188-0_6.



- [27]A. Drigas and G. Kokkalia, "Mobile Learning for Special Preschool Education," *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 60–67, Jan. 2016.
- [28]A. Drigas and J. A. Vlachou, "Information and Communication Technologies (ICTs) and Autistic Spectrum Disorders (ASD)," *Int. J. Recent Contrib. Eng. Sci. IT*, vol. 4, no. 1, pp. 4–10, Mar. 2016.
- [29]F. Pesántez Avilés et al., "Inclusión, discapacidad y educación: Enfoque práctico desde las Tecnologías Emergentes," 2017. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14905>
- [30]D. Cáliz, L. Martínez Normand, and R. Caliz, "USATESTDOWN: A Proposal of a Usability Testing Guide for Mobile Applications Focused on Persons with Down Syndrome," *Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 11-26, Feb. 2017, doi: 10.5121/csit.2017.70302.
- [31]A. R. Cano Moreno, "Aplicación de analíticas en la sistematización del diseño y validación de juegos serios para usuarios con discapacidad intelectual," Ph.D. dissertation, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2019. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/11000>
- [32]A. Peñalba Acitores and Y. Blanco García, "La tecnología músico-gestual para la inclusión: uso de MotionComposer para el desarrollo de competencias transversales, creativas e inclusivas en los Grados de Educación," *Revista Internacional de Educación Musical*, no. 12, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1177/23074841241270314.
- [33]J. F. Villamil Matallana, "IARA y MyDanceDown: Metodología de Enseñanza Orientada a Mobile Learning y su Aplicación en el Desarrollo de Competencias Artísticas en Personas con Síndrome de Down," Ph.D. dissertation, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España, 2024.
- [34]C. Çubukçu Çerasi, M. Canbazoglu, and Y. Ozerdem, "Mobile Game Development for Children with Down Syndrome," *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 14, no. 20, p. 174, Dec. 2020, doi: 10.3991/ijim.v14i20.16573.
- [35]A. A. Enríquez Fuel, "Desarrollo de un serious game como herramienta de apoyo a la enseñanza en niños con síndrome de Down," B.S. thesis, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, 2019.
- [36]N. S. A. Aziz, W. F. W. Ahmad, and N. J. Zulkifli, "User experience on numerical application between children with Down syndrome and autism," in *Proc. International Conference on Human-Computer Interaction*, Bandung, Indonesia, 2015, pp. 27-31, doi: 10.1145/2742032.2742036.
- [37]V. G. Felix et al., "A pilot study of the use of emerging computer technologies to improve the effectiveness of reading and writing therapies in children with Down syndrome," *Br. J. Educ. Technol.*, vol. 48, no. 2, pp. 1-14, 2017, doi: 10.1111/bjet.12426.
- [38]I. Escobar et al., "Mobile application for vowel learning in children with Down syndrome 'LVDS-App'," in *Proc. IEEE Latin American Conference on Learning Technologies*, La Plata, Argentina, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/LACLO.2017.8120913.
- [39]A. Bourazeri, T. Bellamy-Wood, and S. Arnab, "EnCity: A serious game for empowering young people with Down's syndrome," in *2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and*



- Applications for Health (SeGAH), Perth, Australia, 2017, pp. 1-7, doi:
10.1109/SeGAH.2017.7939267.
- [40]E. Toffalini et al., "Environment learning from virtual exploration in individuals with Down syndrome: The role of perspective and sketch maps," *J. Intellect. Disabil. Res.*, vol. 62, no. 1, pp. 30-40, 2018, doi: 10.1111/jir.12445.
- [41]T. Rodrigues et al., "Development of Game-Based System for Improvement of the Left-Right Recognition Ability in Children with Down Syndrome," in *XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering*, 2019, pp. 627-634, doi: 10.1007/978-981-13-2119-1_96.
- [42]P. V. Torres-Carrion et al., "Improving Cognitive Visual-Motor Abilities in Individuals with Down Syndrome," *Sensors*, vol. 19, no. 18, p. 3984, 2019, doi: 10.3390/s19183984.
- [43]R. Arias-Marreros, K. Nalvarte-Dionisio, and L. Andrade-Arenas, "Design of a Mobile Application for the Learning of People with Down Syndrome through Interactive Games," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 11, no. 11, 2020, doi: 10.14569/IJACSA.2020.0111187.
- [44]G. de Oliveira Andrade, R. M. E. M. da Costa, and V. M. B. Werneck, "Stop-Dengue: Game for Children and Adolescents with Down Syndrome," *Int. J. Innov. Educ. Res.*, vol. 8, no. 10, pp. 529-540, 2020, doi: 10.31686/ijer.Vol8.Iss10.2709.
- [45]D. I. M. Parra et al., "Desarrollo de una aplicación móvil aplicando la gamificación como apoyo a la estimulación cognitiva de niños con Síndrome de Down," *LATAM Rev. Latinoam. Cienc. Soc. Humanidades*, vol. 4, no. 1, pp. 2132-2154, 2023, doi: 10.56712/latam.v4i1.403.
- [46]A. Dorantes Salazar, E. Tello Leal, and J. A. López López, "Análisis y diseño de prototipo de aplicación móvil educativa para niños con síndrome de Down," *Pistas Educativas*, vol. 44, no. 144, pp. 39-52, 2023. [Online]. Available: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- [47]H. D. Centeno Aulla et al., "Aplicación móvil en realidad aumentada para la formación y comunicación de niños con Síndrome de Down," *ConcienciaDigital*, vol. 3, no. 3, pp. 215-236, 2020, doi: 10.33262/concienciadigital.v3i3.1307.
- [48]WonyJeong. flutter_piano_audio_detection: Flutter Piano Audio Detection implemented with TensorFlow Lite Model (Google Magenta). GitHub, 2021. [En línea]. Disponible: https://github.com/WonyJeong/flutter_piano_audio_detection.
- [49]A. Acevedo Rojas, V. Naranjo Ramírez, and T. León Cárdenas, *Método graduado de aprendizaje inicial de piano para niñas, niños y jóvenes con síndrome de Down: PianoUp*. Santiago, Chile, 2020.

7 Anexos

Tabla A.1. Aplicaciones educativas encontradas para niños con síndrome de Down en los últimos 10 años

| Nombre | Descripción breve | Referencia | Año |
|-----------------------------------|--|------------|------|
| Lukanikas | Mejora pronunciación, memoria y lenguaje verbal con actividades multisensoriales. | [16] | 2016 |
| HATLE | Herramienta para lectura/escritura en español con reconocimiento de voz y escritura. | [37] | 2016 |
| LVDS-App | Enseñanza de vocales mediante pictogramas y gamificación. | [38] | 2018 |
| Prototipo de aplicación educativa | Trabaja lectura, escritura y coordinación visomotora (método Troncoso). | [43] | 2020 |
| Serious game | Centrado en mejorar lenguaje y memoria. | [35] | 2019 |
| SiDow1.1 (RA) | Usa realidad aumentada con pictogramas 3D para comunicación. | [47] | 2020 |
| MathDS | Enseña habilidades numéricas básicas (contar hasta 10) con elementos lúdicos. | [36] | 2015 |
| Prototipo de aplicación | Juegos de ordenar números, memoria y rompecabezas. | [46] | 2023 |
| VLE SUSKIDS | Entorno virtual para sostenibilidad ambiental con ajuste de dificultad. | [14] | 2024 |
| Encity | Promueve habilidades de vida diaria e inclusión social con minijuegos. | [39] | 2017 |
| Stop Dengue | Juego de concientización sobre dengue con historietas y gamificación. | [44] | 2020 |
| Herramienta basada en cámara | Detecta movimiento corporal para estimular desarrollo motor. | [41] | 2019 |
| TANGO:H | Usa sensores Kinect para estimular habilidades visual-motoras. | [42] | 2019 |
| App para inteligencia espacial | Exploración virtual con joystick para inteligencia espacial. | [40] | 2018 |
| App para memoria y coordinación | Incluye rompecabezas y memorice con refuerzo multisensorial. | [34] | 2020 |
| Aplicación con gamificación | Estimulación cognitiva (memoria) para niños 5-7 años con memorice. | [45] | 2023 |
| IARA y MyDanceDown | Aplicación Mobile Learning diseñada para aprendizaje de pasos básicos de danza. | [33] | 2024 |

Nota: No es una investigación exhaustiva, solo es una búsqueda general de aplicaciones para personas con síndrome de Down.



Tabla A.2. Resultado de la prueba sumativa

| ID | Modo Practica | | Minijuego 1 | | Minijuego 2 | |
|----|---------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| | Éxito | Intervenciones | Éxito | Intervenciones | Éxito | Intervenciones |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0,5 | 2 | 1 | 0 | 0,5 | 3 |
| 7 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 9 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |