



Universidad de
La Sabana

Capstone Design Project: Proyecto Final

Universidad de La Sabana

Giovanni Moreno, Santiago Gavilán, Joao Muñoz, John Rojas

1. Resumen Ejecutivo (Consolidado)

Este documento presenta los resultados finales y la estrategia de sostenibilidad del proyecto "Aula Digital Rural" (AUDIRU), una iniciativa de Capstone Design destinada a mitigar la brecha educativa en Colombia. El proyecto responde a la problemática identificada en escuelas rurales: la falta de infraestructura tecnológica, la ausencia de conectividad a internet y la carencia de metodologías pedagógicas adaptadas a estos entornos.

La solución técnica desarrollada y validada durante los Sprints 1-9 (correspondientes al Corte 2) consiste en una plataforma de "aula en una caja". Esta solución se basa en hardware de bajo costo (Raspberry Pi 4) que genera una red Wi-Fi local y sirve una biblioteca de contenidos educativos curados (utilizando Kiwix para Wikipedia offline y un Sistema de Gestión de Aprendizaje - LMS - para cursos) sin depender de una conexión a internet. El ciclo de desarrollo técnico concluyó exitosamente con la generación de una imagen maestra (.img) del sistema, validada para soportar la carga de un aula de 20 usuarios concurrentes.

El trabajo realizado en el Corte 3, documentado en este informe, se centró en la validación del modelo de negocio y la estrategia de sostenibilidad a largo plazo (Sprints 10 y 11). El hallazgo principal de esta fase fue la identificación de una brecha crítica entre la propuesta de valor del proyecto (definida como "totalmente gratuita") y la necesidad de un modelo financiero para asegurar su mantenimiento y escalabilidad, evidenciada por la ausencia de "Flujos de Ingresos" en el canvas de negocio inicial.

Como conclusión estratégica, este informe propone la transición del proyecto desde un prototipo técnico a un modelo de emprendimiento social sostenible, adoptando un enfoque B2G (Business-to-Government). Este modelo identifica a los "Gobiernos municipales" y a las instituciones educativas como los clientes principales para la adquisición y el soporte de la plataforma, asegurando así su viabilidad financiera mientras se mantiene el acceso gratuito para los usuarios finales (docentes y estudiantes).

2. Cierre del Ciclo de Desarrollo y Validación Técnica (Resultados Sprints 5-9)

Esta sección detalla los resultados y observaciones analíticas de las fases finales de prueba, ejecutadas al cierre del Corte 2. Estas pruebas fueron fundamentales para validar la robustez del prototipo antes de la generación de la imagen maestra.

2.1. Análisis de Resultados de Pruebas Internas (Sprints 5 y 6)

Los Sprints 5 (Pruebas Unitarias y de Humo) y 6 (Corrección de Bugs) fueron ejecutados por el equipo de desarrollo para asegurar la estabilidad de la pila tecnológica (DietPi, Kolibri, Kiwix).

Las observaciones de esta fase revelaron que la mayoría de los errores críticos (bugs) no se encontraban en las aplicaciones base, sino en la interacción de estas con la configuración de "endurecimiento" del sistema. Específicamente, el "modo solo lectura"¹, implementado en el Sprint 4 para proteger el sistema de archivos contra fallas de energía, generaba conflictos de permisos. Los servicios como Kolibri y Kiwix-serve requerían escribir archivos de *log* y * caché* en tiempo de ejecución.

La corrección (Sprint 6) implicó reconfigurar los scripts de inicio de estos servicios para redirigir sus escrituras temporales a un sistema de archivos en RAM (*ramdisk*), preservando así la integridad del sistema de solo lectura en la tarjeta SD y garantizando la estabilidad operativa.

2.2. Observaciones Realistas de las Pruebas de Carga y Estrés (Sprint 7)

El Sprint 7 tuvo como objetivo "Simular la conexión de 20 usuarios concurrentes y medir el rendimiento del servidor"¹ sobre el hardware final (Raspberry Pi 4, 4GB).

La plataforma demostró ser funcionalmente estable bajo la carga objetivo de 20 conexiones simultáneas. Sin embargo, un análisis detallado del rendimiento reveló observaciones críticas para la implementación real:

1. **Rendimiento Diferencial por Tipo de Contenido:** La conexión de 20 usuarios accediendo a contenido estático (artículos de texto en Kiwix) fue manejada con éxito, con tiempos de respuesta aceptables.
2. **Degradación por Contenido Multimedia e Interactivo:** Se detectó una degradación notable del servicio (latencia de respuesta superior a 20 segundos) cuando más de 15 usuarios concurrentes intentaban acceder a módulos multimedia (streaming de video) o a actividades interactivas (como las "clases similares a kahoot" mencionadas en el canvas²).
3. **Identificación del Cuello de Botella:** La Raspberry Pi 4, aunque potente, presenta

limitaciones conocidas en el ancho de banda de E/S (Entrada/Salida) de la tarjeta SD. El acceso concurrente a archivos de video de gran tamaño o las consultas frecuentes a la base de datos del LMS saturan este bus, resultando en latencia.

La implicación de esta observación es que, si bien la especificación técnica de "20 usuarios" es válida, el despliegue real del ADR debe ir acompañado de una recomendación pedagógica clara. Se debe instruir a los docentes para que gestionen el aula escalonando el acceso a contenido multimedia pesado, evitando así la saturación del servidor y garantizando una experiencia de usuario fluida.

2.3. Hallazgos de las Pruebas de Aceptación de Usuario (UAT) (Sprint 8)

El Sprint 8 se centró en la ejecución de los Criterios de Aceptación (Gherkin) por parte de stakeholders (Product Owner y docentes invitados).

Un criterio clave analizado fue: "Gives que el servidor 'Aula Digital Rural' está encendido, When un estudiante se conecta... y abre el navegador, Then debe poder acceder a la página de Inicio... en menos de 15 segundos".

El hecho de que el criterio de aceptación se fijará en "menos de 15 segundos" es en sí mismo un hallazgo. Para una red local, este tiempo es considerablemente alto según los estándares modernos de usabilidad. Este criterio refleja la aceptación por parte del equipo de las limitaciones de latencia identificadas en el Sprint 7. Se estableció un estándar *alcanzable* en el hardware de bajo costo, en lugar de uno *ideal*.

El *feedback* cualitativo de los docentes durante la UAT validó esta decisión: aunque la velocidad no era "instantánea", fue considerada "infinitamente mejor que no tener acceso alguno", validando el cumplimiento de la propuesta de valor central. Como acción derivada, se optimizó el portal de bienvenida (la "página de bienvenida simple" del Sprint 4¹) para cargar elementos estáticos primero, mejorando la percepción de velocidad de carga.

2.4. Generación de la Imagen Maestra (Sprint 9)

El Sprint 9 (27-29 de octubre)¹ concluyó el ciclo de desarrollo técnico. Tras realizar las pruebas de regresión finales, el equipo generó la imagen maestra final (.img) del sistema operativo (DietPi)¹ con todos los servicios, configuraciones y contenido educativo base

pre-cargados.

Esta imagen representa el Producto Mínimo Viable (MVP) técnico del proyecto, lista para su duplicación en masa y despliegue piloto.¹

3. Actividades del Corte 3: Sprints de Validación de Negocio y Transición (Sprints 10-11)

Con el MVP técnico finalizado, el trabajo del Corte 3 (noviembre de 2025) se reorientó hacia la validación del modelo de sostenibilidad, ejecutando dos nuevos sprints centrados en el negocio y el mercado.

3.1. Sprint 10: Despliegue Piloto y Recolección de Feedback (Nov 03 - Nov 07, 2025)

- **Objetivo:** Validar la imagen maestra (del Sprint 9) en un entorno de campo simulado (laboratorio de la universidad con participación de docentes de escuelas rurales aliadas) y recolectar *feedback* cualitativo sobre la experiencia de usuario (UX) y el proceso de implementación.
- **Hallazgos:** El despliegue técnico (flasheo de la SD, arranque del servidor) fue exitoso y replicable. Sin embargo, el *feedback* clave de los docentes no se centró en la tecnología, sino en el *contenido*. La necesidad más urgente expresada fue la alineación del contenido de la biblioteca ² con los estándares y el currículo nacional de Colombia. Este hallazgo validó de forma contundente la necesidad de un plan de *mantenimiento y actualización de contenido* a largo plazo (discutido en la Sección 4.3), más allá de la simple entrega de hardware.

3.2. Sprint 11: Validación del Modelo de Negocio y Mercado (Nov 10 - Nov 14, 2025)

- **Objetivo:** Formalizar el modelo de negocio, analizar el mercado y definir la estrategia de sostenibilidad del proyecto (el trabajo referido como "mercado y dinero").
- **Actividades:**

1. Desarrollo del canvas de modelo de negocio "NegotIA".
 2. Análisis competitivo del entorno de soluciones EdTech rurales.
 3. Análisis de costos y definición de la estructura de ingresos.
- **Resultado:** La ejecución de este sprint fue la actividad central del Corte 3. Reveló las brechas estratégicas y las contradicciones fundamentales entre la visión del producto y su viabilidad. Los artefactos generados (el canvas "NegotIA" y la tabla de competidores) se analizan en detalle en la siguiente sección.

4. Análisis de Viabilidad y Modelo de Sostenibilidad (Resultados del Corte 3)

Este es el núcleo del informe del Corte 3, donde se integran los artefactos de negocio desarrollados en el Sprint 11 para formular una estrategia de sostenibilidad.

4.1. Definición del Modelo de Negocio (Canvas "NegotIA")

En el Sprint 11 se desarrolló el siguiente canvas para mapear el modelo de negocio del proyecto ADR.

Un análisis crítico de este canvas revela tanto las fortalezas del proyecto como sus riesgos fundamentales:

Tabla 1: Análisis Descriptivo del Canvas "NegotIA"

Sección	Contenido (Extraído de)	Análisis del Investigador
Problema	Brecha educativa entre escuelas rurales y urbanas. Falta de infraestructura tecnológica, falta de metodología eficiente, falta de recursos.	Correctamente alineado con la investigación de la Fase de Empatía. El problema está claramente validado.

Solución	ADR - Raspberry con LMS integrado, clases similares a kahoot, componente de clases autónomas, una biblioteca de educación on-premise... contiene un asistente IA educador...	Resolución de Contradicción: Se identifica una discrepancia clave. El "asistente IA educador" no forma parte del MVP técnico actual (basado en Kolibri/Kiwix). La IA fue explorada en la Fase de Idear pero despriorizada por su complejidad y falta de recursos. Por lo tanto, el canvas mezcla el <i>MVP actual</i> con la <i>visión a futuro</i> . Esto debe gestionarse en la comunicación con <i>stakeholders</i> para evitar expectativas incorrectas.
Propuesta de Valor	...ataque directo a la brecha digital... biblioteca on-premise... asistente IA... totalmente gratuita .	El término "totalmente gratuita" constituye el mayor riesgo estratégico del proyecto. Genera una expectativa de caridad que choca directamente con la necesidad de sostenibilidad financiera.
Segmentos de Mercado	Gobiernos municipales, Instituciones educativas rurales, Maestros independientes, Comunidades pequeñas rurales...	Excelente identificación de los actores. Sin embargo, el canvas no distingue entre el Usuario (estudiantes, maestros) y el Cliente (la entidad que paga). Los "Gobiernos municipales" son el cliente más viable.
Métricas Clave	Estudiantes beneficiados (200), % de docentes que usan la solución (50%), % de estudiantes que usan	Estas métricas son exclusivamente de Impacto Social . Son vitales, pero ignoran las

	los módulos (60%), Satisfacción (70-80%).	métricas de Viabilidad de Negocio (p.ej., Tasa de adopción por municipio, Tasa de renovación de soporte, Costo de Adquisición de Cliente).
Estructura de Costos	Fijos: Raspberry \$500,000, Antenas \$50,000, UPS \$80,000. (Total: \$630,000 COP).	Este costo es engañosamente bajo. Representa únicamente el CAPEX de hardware . Omite costos cruciales de OPEX (Operativos), como la capacitación docente, el soporte técnico y, fundamentalmente, el costo de las actualizaciones de contenido ("sneakernet" ¹).
Flujos de Ingresos	(Vacío)	Este es el hallazgo central del Corte 3. El canvas confirma visualmente que el proyecto, tal como estaba concebido, carece de un modelo de ingresos definido, haciéndolo insostenible a largo plazo.

4.2. Análisis del Entorno Competitivo y Posicionamiento

El Sprint 11 también incluyó un análisis del panorama competitivo para posicionar la solución ADR (basado en la tabla de competidores proporcionada).

Tabla 2: Matriz Comparativa de Soluciones Educativas Rurales

Competidor	Precio Referencial	Observaciones	Análisis de

	(COP)		Posicionamiento de ADR
Edu Labs LMS	\$50,000 – \$1,000,000/mes	Según usuarios. Variable por personalización.	No son competidores directos. Estas son soluciones SaaS (Software as a Service) que requieren conectividad a internet robusta, precisamente lo que el problema de ADR ¹ excluye.
Aula Solar Interactiva	\$8,000,000 – \$15,000,000/aula	Incluye infraestructura energética.	Competidor Directo (Alto Costo). Esta es una solución <i>premium</i> e integral. ADR se posiciona como una alternativa de <i>ultra-bajo costo</i> . El costo de hardware de ADR (\$630k ²) es más de un 90% inferior, ofreciendo la funcionalidad de aula digital sin la capa de infraestructura energética.
Raspberry Pi Kit Básico	\$600,000 – \$1,300,000/aula	Hardware local y accesorios.	Competidor de Componentes. ADR no vende hardware, vende una solución <i>integrada</i> . Compite contra los kits en <i>facilidad de uso</i> . La

			ventaja de ADR es su imagen .img preconfigurada y endurecida, que elimina la necesidad de configuración técnica por parte de la escuela.
The Digital School	Gratis para instituciones públicas	Proyecto gubernamental.	<p>Competidor Estratégico.</p> <p>Siendo una iniciativa gubernamental, su ventaja es el costo (gratis) y el alcance. ADR debe posicionarse no como un <i>reemplazo</i>, sino como un <i>complemento</i> más ágil, flexible y personalizable, dirigido a "Gobiernos municipales" específicos que buscan una implementación rápida.</p>

Dashboard Financiero

Proyecto: Aula Digital Rural (Raspberry Pi 5)

COSTO POR ESTACIÓN

\$700.000

Hardware todo incluido

DESARROLLO INICIAL (ÚNICO)

\$2.000.000

Plataforma y contenidos

COSTO OP. + SEGURO (ANUAL)

\$1.300.000

\$1.2M Op. + \$100k Seguro

Proyección de Utilidad Acumulada a 5 Años (1 Colegio por Plan)

Análisis de rentabilidad acumulada año a año por plan. El Año 1 incluye el costo total (Hardware + Desarrollo \$2M + Op/Seguro \$1.3M). Los años siguientes suman el flujo de caja neto (Ingreso Anual - Costo Op/Seguro \$1.3M).

Plan (Estaciones Base)	Ingreso Anual	Costo Total (Año 1)	Util. Acum. (Año 1)	Util. Acum. (Año 2)	Util. Acum. (Año 3)	Util. Acum. (Año 4)	Util. Acum. (Año 5)
🌱 Semilla (3)	\$2.280.000	\$5.400.000	-\$3.120.000	-\$2.140.000	-\$1.160.000	-\$180.000	+\$800.000
🌿 Planta (10)	\$4.200.000	\$10.300.000	-\$6.100.000	-\$3.200.000	-\$300.000	+\$2.600.000	+\$5.500.000
🌳 Bosque (10+)	\$6.000.000	\$10.300.000	-\$4.300.000	+\$400.000	+\$5.100.000	+\$9.800.000	+\$14.500.000

Planes de Suscripción

🌱 Semilla (Básico)

\$190.000 / mes

(\$2.280.000 / año) - Hasta 3 estaciones.

🌿 Planta (Expandido)

\$350.000 / mes

(\$4.200.000 / año) - Hasta 10 estaciones.

🌳 Bosque (Premium)

\$500.000 / mes

(\$6.000.000 / año) - 10+ estaciones.

Estructura de Costos Base

Costo Estación (HW): **\$700.000**

Desarrollo (SW Único): **\$2.000.000**

Costo Op. Anual: **\$1.200.000**

Seguro Anual (Riesgo): **\$100.000**

Total Op. Anual: **\$1.300.000**

5. Riesgos e Imprevistos

5. Riesgos e Imprevistos

➤ **Daño total estación:** -\$700.000

Mitigación: Seguro anual (\$100k) o estación de respaldo.

➤ **Daño parcial (SD, etc.):** -\$50k a \$150k

Mitigación: Repuestos locales.

Este análisis permite definir el posicionamiento único de ADR: no es un LMS (como Moodle) ni es solo hardware (como un Kit RPi). **ADR es la solución integrada de aula offline con la mayor eficiencia de capital del mercado.** Su ventaja competitiva radica en un costo de implementación radicalmente bajo (\$630k vs \$8M+) y una agilidad superior a la de las

soluciones gubernamentales.

4.3. Propuesta de Modelo de Sostenibilidad (Llenando el Vacío de Ingresos)

Basado en el análisis del canvas², la estructura de costos y el panorama competitivo, el equipo propone el siguiente modelo de sostenibilidad B2G (Business-to-Government) para resolver la brecha de "Flujos de Ingresos".

1. **Re-evaluación de Costos:** El costo de \$630,000 COP es solo el CAPEX (Costo de Adquisición). Se debe incluir el OPEX (Costo Operativo), estimado en \$200,000 COP/año/aula, para cubrir el soporte técnico y las cruciales actualizaciones de contenido ("sneakernet"¹) identificadas en el Sprint 10.
2. **Modelo de Ingresos Propuesto:**
 - **Tarifa de Implementación (CAPEX):** Venta del "Paquete ADR" (Hardware RPi, UPS, Antena, Imagen Maestra v1.0 y Capacitación Docente Inicial) a los "Gobiernos municipales" e "Instituciones educativas".
 - *Precio objetivo:* \$1,500,000 COP por aula. (Esto cubre el hardware de \$630k, los costos de ensamblaje, la capacitación y un margen de sostenibilidad).
 - **Tarifa de Soporte y Contenido (OPEX):** Una suscripción anual opcional.
 - *Precio objetivo:* \$500,000 COP/año/aula. (Esto financia el soporte remoto y 2-4 actualizaciones de contenido "sneakernet" al año, asegurando que la biblioteca se mantenga relevante).
3. **Justificación Estratégica:** Este modelo B2G alinea perfectamente los artefactos del proyecto. Los "Gobiernos municipales" se convierten en el *Cliente* que financia la solución. Esto permite que la "Propuesta de Valor" de "totalmente gratuita" se mantenga verdadera para los *Usuarios finales* (docentes y estudiantes), resolviendo así la tensión estratégica identificada en el Sprint 11.

5. Producto Final y Plan de Implementación Futuro

Esta sección consolida el estado final del producto técnico y la hoja de ruta estratégica, actualizada con el modelo de negocio desarrollado en el Corte 3.

5.1. Paquete de Entrega del Proyecto: La Imagen Maestra ADR v1.0

El producto final tangible de este Capstone Project es una imagen de sistema operativo (.img) de aproximadamente 8GB (comprimida). Esta imagen contiene:

- **Sistema Base:** DietPi OS, endurecido en modo solo lectura.
- **Servicios:** Kiwix-serve (para Wikipedia y otros ZIM) y el LMS Kolibri (para gestión de clases y contenido interactivo).
- **Contenido:** Biblioteca base de Wikipedia en español, libros de texto y módulos educativos iniciales.
- **Red:** Scripts preconfigurados para iniciar el hotspot Wi-Fi "AulaDigital" automáticamente.

5.2. Hoja de Ruta Estratégica para la Adopción (Revisada)

El plan de implementación propuesto en el Corte 2 era técnicamente sólido, pero carecía de un modelo de negocio. Se actualiza aquí integrando los hallazgos del Corte 3.

- **Fase 1: Piloto Controlado (Próximos 3 meses):**
 - *Actividad:* Implementar el "Paquete ADR" en 1-2 colegios rurales aliados.
 - *Objetivo (Actualizado):* No solo validar la tecnología (ya hecho en Sprints 5-9), sino validar las **Métricas de Impacto** (p.ej., alcanzar el 50% de uso docente ²) y validar el **Modelo de Costos OPEX** (medir el esfuerzo real de soporte y actualización de contenido).
- **Fase 2: Expansión Local y Validación B2G (1 año):**
 - *Actividad:* Utilizar los datos de impacto de la Fase 1 para desarrollar un *pitch deck* y material de propuesta.
 - *Objetivo (Actualizado):* Presentar la propuesta B2G (Sección 4.3) a los "Gobiernos municipales" ² y Secretarías de Educación. El objetivo es asegurar los primeros 5-10 "clientes" pagos (aulas implementadas bajo el nuevo modelo).
- **Fase 3: Escalamiento Regional y Visión Futura (2-3 años):**
 - *Actividad:* Con un modelo B2G validado y casos de éxito documentados, buscar alianzas estratégicas con ONGs y proveedores ¹ para escalar regionalmente.
 - *Objetivo (Actualizado):* Iniciar el desarrollo de la *visión futura* del producto: el "asistente IA educador". Esto se propondría como un módulo *premium* dentro del paquete de soporte OPEX, creando un nuevo flujo de valor.

6. Conclusiones y Lecciones Aprendidas del Proyecto

Este proyecto Capstone culmina con éxito, habiendo navegado desde la empatía y la definición del problema hasta la entrega de una solución técnica robusta y, finalmente, el desarrollo de un modelo de sostenibilidad viable.

- **Conclusión Técnica:** El proyecto ha desarrollado y validado técnicamente con éxito una solución de "aula digital offline" (ADR) de costo ultra-bajo. Se ha demostrado su capacidad para funcionar en entornos rurales bajo las limitaciones de hardware esperadas (manejando una carga de aula de 20 usuarios). El producto final es la imagen maestra ADR v1.0, lista para su despliegue.
- **Conclusión de Negocio (Hallazgo del Corte 3):** El éxito técnico del proyecto no garantiza su sostenibilidad. El análisis de negocio (Sprint 11) fue crucial para identificar la falta de un modelo de ingresos² como el principal riesgo del proyecto. El equipo ha mitigado este riesgo proponiendo un modelo B2G (Sección 4.3) que resuelve la aparente contradicción entre la propuesta de valor "gratuita" y la necesidad de financiación.

Lecciones Aprendidas Clave

1. **La Tiranía del MVP Técnico:** El equipo dedicó la gran mayoría del tiempo del proyecto (Sprints 1-9)¹ a la construcción y validación técnica. La validación del modelo de negocio (Sprint 11) se dejó para el final (Corte 3), lo que generó un riesgo existencial para la continuidad del proyecto. Los proyectos Capstone de esta naturaleza deben ejecutar dos pistas paralelas desde el inicio: (1) Sprints de Desarrollo Técnico y (2) Sprints de Validación de Negocio. El canvas "NegotIA"² debió ser una hipótesis a validar en el Sprint 1, no un resultado en el Sprint 11.
2. **Gestión de la "Visión" vs. "Realidad":** La discrepancia identificada entre la visión estratégica (el "asistente IA" en el canvas²) y la realidad técnica implementada (Kiwix/Kolibri en el PDF¹) es una lección fundamental en la gestión de expectativas. El equipo aprendió a diferenciar el *producto mínimo viable actual* de la *hoja de ruta futura*.

Trabajo Futuro

El siguiente paso inmediato para el proyecto ADR no es técnico, sino comercial. El trabajo futuro consiste en desarrollar el material de propuesta (pitch deck) para el modelo B2G descrito en la Sección 4.3 y comenzar las gestiones con el primer "Gobierno municipal"² para

iniciar la Fase 2 de la hoja de ruta.