0. PROYECTO TITÁN

Entorno Sintético de Adiestramiento Táctico sobre Gemelo Digital Bidireccional
La realidad, antes de la realidad

Cliente · Ejército Nacional de Titiribí
Escenario · OPERACIÓN COMPUERTA
Versión 1.0 · agosto de 2026

Resumen ejecutivo:

El adiestramiento táctico obliga hoy a escoger entre realismo y repetibilidad. Un ejercicio de campo es real, costoso e irrepetible. Un simulador convencional es barato, artificial y no transferible. Ninguno de los dos acumula lo que produce: el conocimiento táctico generado en un ejercicio vive en la memoria de quienes estuvieron, y la rotación de personal lo disipa.

TITÁN replica una instalación estratégica real al centímetro y la mantiene viva con drones y sensores. Dentro habita un adversario que aprende y nunca repite maniobra. El comandante describe en su propio lenguaje la operación que quiere ensayar y el sistema la construye completa terreno, clima, oposición, objetivos y contingencias. Cada decisión del escuadrón queda registrada. Lo que la fuerza aprende adentro regresa afuera convertido en doctrina, validada y firmada por un oficial.

1. El problema y su definición:

Un ejército no puede entrenar dentro de la central que debe proteger. Esa frase resume el encargo mejor que su enunciado formal. El cliente lo plantea como una demostración de gemelos digitales, y una demostración se satisface con una réplica visualmente convincente que no cambia nada en el adiestramiento de una unidad. El problema real no es de representación: es de ciclo.

DIMENSIÓN	EJERCICIO DE CAMPO	SIMULACIÓN CONVENCIONAL
Costo marginal por repetición	Alto y constante. La frecuencia la fija el presupuesto, no la curva de aprendizaje.	Cercano a cero una vez amortizada la plataforma.
Terreno	Real, pero irrepetible: luz, clima y personal no se reproducen.	Genérico o de biblioteca. No corresponde a ninguna instalación bajo responsabilidad de la fuerza.
Adversario	Unidad propia con orden conocida. La sorpresa doctrinal es difícil de producir.	Árbol de comportamiento. El operador **aprende a vencer el sistema, no al adversario**.
Riesgo y captura	Real: se restringen los escenarios más formativos. El dato de decisión se registra a mano.	Nulo, y también nula la carga física que condiciona la decisión.

El tercer costo:

Entre un ejercicio y el siguiente ocurre una pérdida que no aparece en ningún presupuesto: la doctrina aprendida no se deposita en ninguna parte. Vive en la memoria de quienes estuvieron. Los traslados y el paso del tiempo la disipan, y cuando la unidad vuelve a enfrentar un problema análogo lo enfrenta desde cero. El costo de oportunidad y el de riesgo se contabilizan tarde o mal, el costo de olvido no tiene siquiera instrumento de medición, y es el mayor de los tres.

Decisión del equipo:

La telemetría de decisión es componente de primera clase, con prioridad de arquitectura equivalente al motor de representación. porque el valor del sistema no está en la calidad de su imagen sino en la densidad de su instrumentación. Un entorno hermoso y no instrumentado reproduce el problema con mejor gráfica.

Alcance: qué resuelve y qué no:

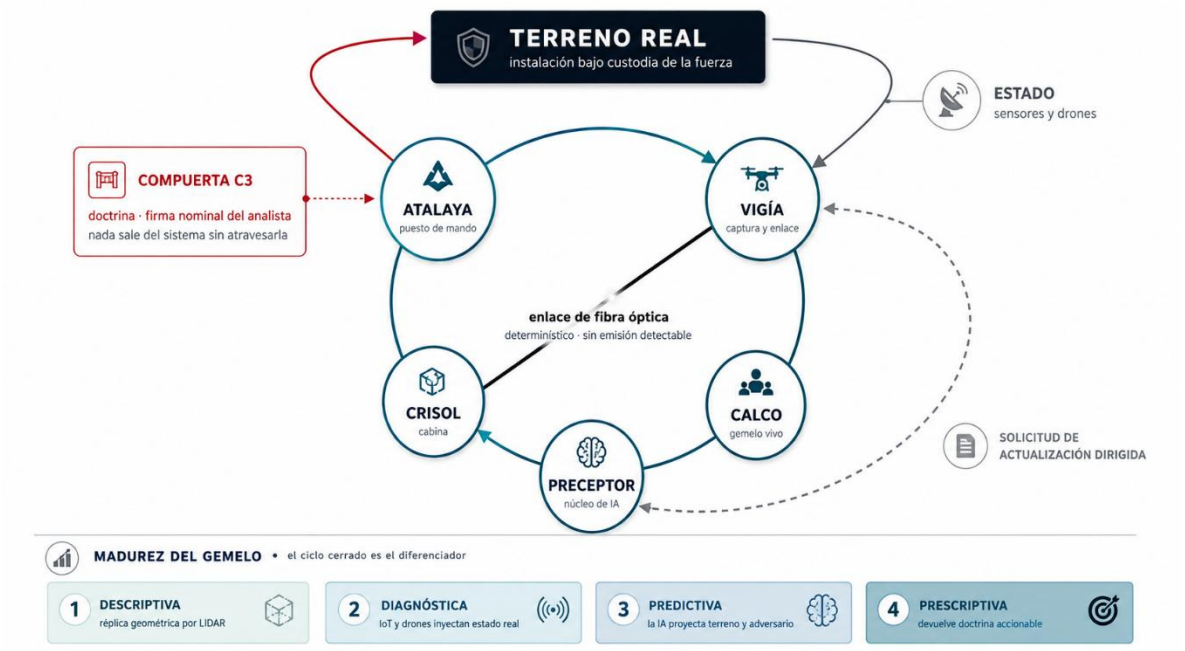
SÍ RESUELVE	NO RESUELVE
Decisión táctica a nivel escuadrón en entorno urbano-industrial	Tiro real: la habilidad balística fina no es replicable con fidelidad suficiente
Ensayo de misión sobre instalación real replicada	Acondicionamiento físico: se reproduce el perfil del esfuerzo, no su volumen fisiológico
Generación de escenario desde intención en lenguaje natural	Mando y control de operaciones reales. No dirige ni asiste fuerzas desplegadas
Fuerza opositora con doctrina propia y conducta emergente	Inteligencia sobre terceros: el gemelo replica instalación propia bajo custodia
Telemetría de decisión con taxonomía de error táctico	Recomendación autónoma: toda salida pasa por revisión de un oficial doctrinal
Carga física diferencial: pendiente, terreno blando, carga, frenado	Datos personales de terceros civiles: el polígono es instalación industrial, no casco urbano
Telemetría, perfilado del operador y repositorio doctrinal	Inteligencia sobre terceros, nube pública u operación fuera del territorio

Por qué un complejo industrial y no una base ni un pueblo:

Cuatro razones, evaluadas con criterios ponderados frente a base militar propia, casco urbano y terreno rural abierto. Densidad de coberturas verticales: transformadores, casa de máquinas, cresta de presa y pasarelas producen oclusión en tres ejes sobre poca superficie. Valor logístico intrínseco: la instalación es objetivo por lo que contiene, lo que subordina la maniobra a un propósito. Riesgo secundario: los transformadores en aceite y la casa de máquinas convierten una porción del terreno en zona de fuego restringido, donde la respuesta correcta al contacto puede ser no responder el dilema de mayor valor formativo del sitio, y el que da nombre a la primera viñeta (vignette): retomar una central sin destruir lo que se vino a proteger. Y relevancia de misión real: la protección de infraestructura energética es responsabilidad efectiva y recurrente de la fuerza.

2. La propuesta:

No es una réplica estática. Es un gemelo digital bidireccional y vivo, llevado al nivel prescriptivo: sensores y drones la mantienen actualizada, la IA proyecta cómo evolucionarán terreno y adversario, y el sistema devuelve doctrina accionable. Ese ciclo cerrado es el diferenciador, y ningún referente del mercado lo cubre completo.



El núcleo de IA es el producto:

El centro del sistema no es la representación: es un núcleo que genera el escenario cuando el comandante delimita una zona y describe la operación; produce oposición con doctrina propia y no con guiones; crea situaciones inéditas; perfila los sesgos del operador para ajustar el tipo de dilema; y alimenta un repositorio doctrinal. Su autonomía se ejerce hacia adentro del entorno sintético y termina en su frontera.
La técnica que hace posible la capa geométrica no nace en la defensa: la captura fotogramétrica de emplazamientos reales llegó a escala de producción en la industria del entretenimiento hacia 2019. No tiene que servir solo para entretener: puede servir para entrenar. Es el origen declarado de esta propuesta.

SUBSISTEMA	FUNCIÓN Y POR QUÉ SE LLAMA ASÍ
VIGÍA	Reconocimiento con LiDAR, enlace de fibra hacia cabina y captura de movimiento real en campo.
CALCO	Gemelo geoespacial vivo en cuatro capas con vida útil declarada. Es el término doctrinal de la lámina que se superpone a la carta.
PRECEPTOR	Núcleo de IA. De *praeceptum*, la norma. Traduce intención, genera escenario, conduce la oposición y perfila al operador.
CRISOL	Cabina: envolvente de paneles, campo acústico de alto orden y suelo de resistencia magnética variable.
ATALAYA	Puesto de mando: observación en vivo, telemetría de decisión y custodia del repositorio doctrinal.

De la intención al escenario:

El comandante traza el perímetro y describe la operación con sus palabras. El sistema devuelve una ficha de intención interpretada muestra lo que entendió antes de actuar y construye el escenario en menos de quince minutos.

«Ensayo de recuperación del sector oriental con el escuadrón entrando por el suroeste, de noche, con lluvia, sin poder abrir fuego cerca de los depósitos, y suponiendo que el enemigo ya sabe que venimos.»

Ninguna de esas seis condiciones sale de una lista desplegable. La última no es ambiental: es una postura de la fuerza opositora, y modifica la política del agente, no la iluminación.

Por qué no es un catálogo con más entradas:

DIFERENCIA	ESCENARIO PRECARGADO	GENERACIÓN DESDE INTENCIÓN
Cardinalidad, adaptación y autoría	Conjunto finito que el operador termina por mapear. El comandante adapta su necesidad al catálogo, definido meses antes por un diseñador	Espacio combinatorio sobre el estado actual del terreno. Decide hoy quien tiene la misión, en minutos, y ensayar variantes es operación nativa
Registro	Queda qué escenario se eligió	**Queda la pregunta táctica que el comandante quiso responder**: acumulada, es un mapa de las preocupaciones reales de la fuerza

Decisión del equipo:

El gemelo no es un archivo sino un estado mantenido, y el sistema se bloquea a sí mismo cuando su dato caduca. Porque una instalación en operación cambia todas las semanas y el levantamiento toma diez. Sin reingesta, el realismo es una fotografía vencida que nadie advierte.

3. Operación Compuerta:

TITÁN no es un escenario: es un motor capaz de convertir cualquier zona del gemelo digital nacional en un ejercicio de adiestramiento. Operación Compuerta existe para demostrar, en una sesión, todo lo que la plataforma sabe hacer.

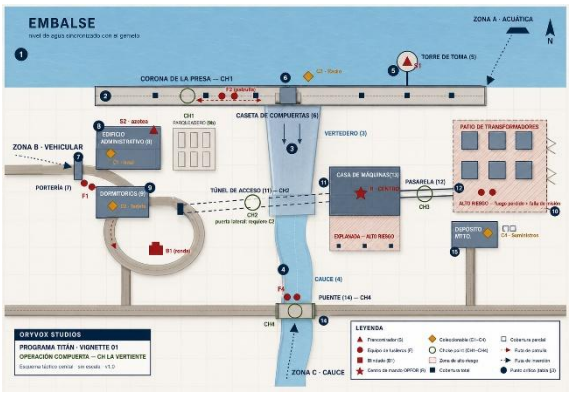
Contexto de la vignette:

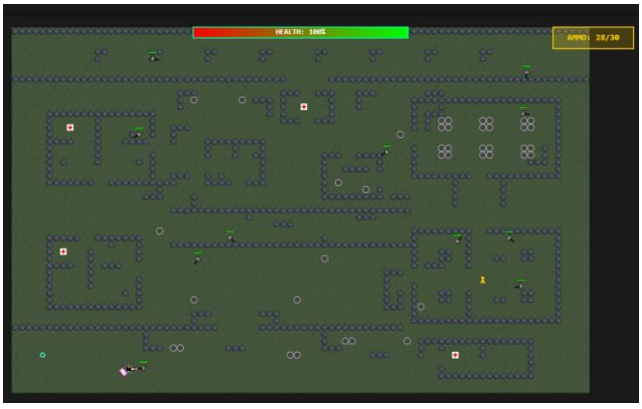
Un grupo armado ilegal ha tomado la Central Hidroeléctrica La Vertiente y prepara el sabotaje de sus turbinas. La unidad propia debe retomar la casa de máquinas y neutralizar el centro de mando enemigo antes de que el sabotaje se complete, preservando intacta la infraestructura que vino a rescatar. El perfil corresponde a la protección de infraestructura crítica energética, tarea real de los Batallones Especiales Energéticos y Viales.

Dimensión	Capacidad de la plataforma
Entorno	Cualquier zona cargada en el gemelo nacional; nuevas zonas se incorporan por captura o importación de modelos existentes.
Datos	Modo Vivo con sincronización continua, o modo Instantánea congelado a una fecha para ejercicios repetibles.
Origen del escenario	Generado por IA desde la orden del comandante, diseñado por un instructor, o tomado de la biblioteca curada.
Condiciones ambientales	Clima, hora, visibilidad y estación definidos al inicio o alterados en vivo por la IA o el instructor.
Escala	De escuadra a pelotón en el demostrador; arquitectura preparada para compañía.

Mapas y elementos del del nivel:

N°	Elemento	Función táctica	Vínculo con el gemelo digital
1	Embalse	Aproximación acuática desde la Zona A; superficie abierta sin cobertura.	El nivel del agua es un dato del gemelo: cambia la orilla utilizable.
2	Corona de la presa — CH1	Único paso elevado este-oeste. Largo, estrecho y expuesto.	Su geometría real define líneas de visión y ritmo del avance.
3	Vertedero	Barrera vertical infranqueable cuando descarga.	Su estado lo controla la caseta: geografía dinámica del gemelo.
4	Cauce aguas abajo	Ruta de infiltración C: lenta, cubierta, sin líneas de visión largas.	La sección hidráulica determina si es vadeable.
5	Torre de toma	Posición dominante del francotirador S1: controla la corona completa.	Altura y campo visual calculados con la geometría exacta de la torre.
6	Caseta de compuertas	Consola del giro mecánico. Tránsito obligado entre la corona y el resto.	Punto de control físico → virtual: cada acción cambia el estado simulado.
7	Portería	Control de acceso vehicular oeste; primer contacto de la Zona B.	La caseta y la talanquera reales definen el embudo de entrada.
8	Edificio administrativo	Dominante del sector oeste; azotea = S2. Contiene C1.	Planta arquitectónica real: despeje habitación por habitación.
9	Dormitorios	Cobertura parcial; contiene C2, la tarjeta de acceso.	Distribución interior tomada del modelo del gemelo.
10	Patio de transformadores	ZONA DE ALTO RIESGO: fuego perdido dispara la condición de aborto.	La matriz de equipos energizados viene del modelo de activos.
11	Túnel de acceso — CH2	Ruta subterránea, oscura, sin flanqueo. Requiere C2.	Trazado real del túnel de servicio.
12	Pasarela — CH3	Paso elevado angosto, expuesto a F3 y a la reserva.	Capacidad de carga y barandales del modelo estructural.
13	Casa de máquinas	OBJETIVO PRINCIPAL: el centro de mando OPFOR opera entre las turbinas.	Interior por niveles con corte por planta en vista cenital.
14	Puente vehicular — CH4	Único cruce sur del cauce.	Ancho real de dos carriles: un vehículo bloqueado lo cierra.
15	Depósito de mantenimiento	Contiene C4: cargas antitanque y material médico.	El inventario refleja el sistema de gestión de activos de la planta.





Fuerza opositora, coleccionables tácticos y condiciones de cumplimiento y de aborto:

Unidad	Posición	Lógica de emplazamiento
S1	Torre de toma	Niega la corona a cualquier avance descubierto. Enseña: nunca cruzar un paso elevado sin dominar la altura que lo vigila.
S2	Edificio administrativo	Cubre la aproximación oeste y el parqueadero. Enseña: los techos dominan los patios.
F1	Explanada central	Patrulla con ruta observable. Su alerta temprana activa a la reserva.
F2	Corona de la presa	Par móvil este-oeste. Su ciclo es cronometrable desde la orilla: recompensa el reconocimiento previo.
F3	Patio de transformadores	Defensa en la zona de alto riesgo. Fuerza el dilema central: enfrentarla con fuego directo arriesga la falla de misión.
F4	Puente vehicular	Bloquea el cruce sur y vigila la salida del cauce.
B1	Circuito vial oeste	Blindado en ronda de ciclo fijo. Invulnerable a fuego ligero: se evita cronometrando o se neutraliza con C4. Enseña planeación temporal, no potencia de fuego.
R	Casa de máquinas	Reserva de asalto y objetivo principal. Reacciona a las alarmas convergiendo; una alarma falsa la desplaza fuera de posición.

Coleccionable	Ubicación	Ventaja mecánica	Por qué incentiva el reconocimiento
C1 · Documentos de inteligencia	Edificio administrativo	Revela las posiciones OPFOR del sector oriental	Premia despejar el sector antes de cruzar: quien va directo entra ciego
C2 · Tarjeta de acceso	Dormitorios	Abre la puerta lateral del túnel: flanqueo que evita la pasarela	Convierte un edificio secundario en llave de la mejor ruta
C3 · Frecuencia de radio	Caseta de compuertas	Muestra el patrón de F2 y anticipa la reacción de la reserva	Recompensa tomar la corona con sigilo en lugar de rodearla
C4 · Caja de suministros	Depósito de mantenimiento	Cargas antitanque: única forma de neutralizar al blindado	Obliga a reconocer la margen oriental, la menos transitada

Condición	Detalle y justificación
CUMPLIMIENTO · Principal	Neutralizar el centro de mando dentro de la casa de máquinas antes de que complete el sabotaje. Coincide con el ejemplo del encargo.
CUMPLIMIENTO · Secundario	Asegurar la caseta de compuertas intacta: habilita el giro mecánico y bonifica en la evaluación posterior.
ABORTO · Destrucción de infraestructura	Si el fuego propio o enemigo detona la cadena del patio de transformadores, la misión falla. La derrota puede ser autoinfligida: el escenario enseña disciplina de fuego, no potencia de fuego. Es la traducción jugable del propósito real de la misión.
ABORTO · Pérdida del escuadrón	Bajas del cien por ciento de la unidad propia.
ABORTO · Tiempo excedido	El temporizador de sabotaje es el reloj de la misión: visible solo tras obtener C1 o C3. La presión de tiempo también premia la inteligencia.

4. La experiencia:

Dos vistas, dos usuarios, y la brecha entre ellas:

El operador habita el terreno desde la cabina y nunca ve la vista cenital; el comandante conduce desde la mesa y nunca entra en la cabina.
La vista cenital es la del mando porque la conciencia situacional es relacional, no perceptual: posición relativa, tiempo de reacción y apoyo mutuo son geometría de conjunto, y eso se lee desde arriba. Y porque la mesa no es omnisciente: se puebla con lo que las plataformas observan y los operadores reportan, así que lo que nadie ha visto no está en el mapa. La incertidumbre es el estado epistémico real de un puesto de mando.
La brecha entre ambas vistas es el problema táctico. El operador ve un contenedor metálico y lo lee como cobertura, el comandante ve un símbolo junto a un rectángulo y no sabe de qué material está hecho. Esa asimetría produce las decisiones que el ejercicio entrena, y solo existe si las dos vistas son de verdad distintas.

La cabina: donde nace la inmersión

El operador entra y la envolvente está en gris neutro, sin geometría: el sistema del equilibrio necesita una referencia estable antes de que empiece el movimiento visual. Camina una calibración de cuatro tramos y el sistema aprende su masa, zancada y presión plantar. Después pulsa la parada de emergencia con su propia mano, en cada ingreso: convierte la seguridad de abstracción en memoria motriz, y es lo que hace posible la inmersión, porque se entrega al entorno sabiendo con el cuerpo cómo salir de él.

SENSACIÓN	CÓMO NO SE PRODUCE	CÓMO SE PRODUCE
Pendiente	Inclinando la plataforma	Con fuerza horizontal opuesta al avance, proporcional al gradiente del gemelo en la posición actual. Ninguna superficie se mueve
Terreno blando	Con más fuerza constante	Con demora y complianza: la marcha se vuelve ineficiente sin volverse pesada
Carga	Solo con peso hacia abajo	Peso distribuido por arnés más resistencia a la aceleración: cuesta arrancar y cuesta detener
Inercia	—	Resistencia al cambio de velocidad en ambos sentidos. Lo que más delata a un simulador cuando falta

El puesto de mando y las dos pasadas:

ATALAYA ve más que el comandante, y la asimetría es deliberada: el comandante tiene la incertidumbre, ATALAYA el estado verdadero. Verlos juntos permite la única pregunta que evalúa bien una decisión: no si salió bien, sino si era correcta con lo que se podía saber. Un sistema que evalúa por resultado enseña a apostar.

Durante el ejercicio no entrega retroalimentación, porque interrumpir destruye el dato que la iteración producía. Después, en dos pasadas: «lo que usted sabía», reproduciendo el ejercicio desde el estado de información del propio operador, y «lo que era cierto». La diferencia es la lección. La mayoría de los análisis posteriores muestran lo que ocurrió; este muestra lo que era averiguable, que es lo único sobre lo que se podía actuar.

Carga cognitiva y accesibilidad:

La información no solicitada compite con la percepción: el HUD conserva solo integridad y munición, y solo la seguridad puede interrumpir. La carga se mide en ambos extremos, porque carga insuficiente significa que el dilema no exigió decisión. La progresión no sube el número de unidades hostiles —ese es el eje perezoso, entrena volumen y no criterio— sino el tipo de dilema: incertidumbre, simultaneidad, presión temporal y ambigüedad doctrinal. El cuarto fabrica expertos: el competente resuelve problemas con solución, el experto decide cuando dos cursos son defendibles y carga con la elección. La exclusión por contraindicación electromagnética es absoluta; fuera de eso el adiestramiento decisional es plenamente accesible con configuración de estación, y toda configuración queda registrada para que las comparaciones sigan siendo válidas.

5. Riesgo:

Se identificaron 37 riesgos con probabilidad e impacto de 1 a 5. Se añade una columna que el encargo no pedía —**exposición residual**— porque varias decisiones de arquitectura ya tomadas fueron adoptadas como tratamiento de riesgo, y presentar solo la exposición bruta ocultaría que el diseño ya pagó parte del problema. La reserva de contingencia se calcula sobre residual. Exposición bruta agregada 467, residual 203: una reducción del 56,5 %.

ID	RIESGO, ENUNCIADO COMO EVENTO	P×I	TRATAMIENTO	RES
R-01	Un escuadrón entrena sobre una versión del terreno que dejó de corresponder con la instalación, y decide bien para un terreno que ya no existe	20	Capas con vida útil declarada y **bloqueo activo**; reingesta disparada por detección de cambio, no por calendario	8
R-15	Un operador sufre lesión por fuerza magnética fuera de límite	20	Limitador por hardware independiente del software; progresión obligatoria sin carga, maniquí y sujeto; estado seguro pasivo ante corte de energía	5
R-21	El operador rinde alto porque aprendió a vencer el sistema, y sale con confianza en una competencia que no existe fuera de la cabina	20	Doctrina como envolvente del espacio de acción y no como árbol; recursos como parámetro; política declarada agotada al superar 35 % de anticipación	10
R-23	La doctrina devuelta reproduce los sesgos del corpus y la institución los adopta como hallazgo propio	16	Corpus tratado como material fechado; generación no restringida al repertorio histórico; célula humana como control externo	9
R-27	No se cubren los perfiles de refuerzo multiagente y electromagnetismo, y dos paquetes quedan sin conducción técnica	16	Contratación internacional acotada con dos contrapartes locales y transferencia contractual obligatoria	9
R-30	El corpus doctrinal no se entrega o su clasificación impide el afinamiento	16	Alternativa acotada con pesos custodiados por el cliente. Si falla, plantillas estructuradas, **y debe reportarse como degradación, no absorberse**	9
R-22	El estudio de transferencia no muestra diferencia frente a la cohorte control	15	Revisión del diseño del dilema antes que de la tecnología; si persiste, se informa que la promesa central no está probada	10

R-37	Un tercero obtiene el gemelo, su estado operativo y el repositorio doctrinal de una instalación crítica real	15	Compartimentación en cuatro enclaves; caducidad como control; marcadores testigo por copia	10

Trece de los 37 quedan en banda extrema; arriba van los ocho de mayor exposición. Los restantes —precisión, nubosidad, latencia, escala, regulación aérea, interferencia médica, cinetosis, adopción institucional, cronograma, cambiario, aduanero y soberanía del dato, entre otros— están tratados con la misma estructura.

El riesgo más grave: compromiso del gemelo

El activo no es un modelo tridimensional. Es la conjunción de cuatro cosas: la geometría centimétrica de una instalación crítica real, su estado operativo en tiempo real, la doctrina de su defensa y la telemetría que muestra dónde y con qué recurrencia se equivocan los operadores que la custodian. **Ninguna es catastrófica por separado. Las cuatro juntas constituyen un expediente de planificación contra una instalación física real con sus defensores caracterizados.** El sistema las produce juntas por diseño: su valor y su peligro vienen de la misma propiedad.

De ahí se sigue algo que conviene enunciar sin rodeos: **el riesgo no se reduce haciendo el gemelo menos preciso, porque la precisión es el producto.** Solo quedan dos vectores de control. **Compartimentación**: los cuatro activos no coexisten en ningún enclave —tránsito, geometría, estado operativo y repositorio doctrinal viven separados, con flujo unidireccional desde la ingesta—, de modo que quien obtiene el mapa no obtiene la doctrina. Y **caducidad**: el estado operativo no se conserva más allá de su vida útil, así que un estado exfiltrado queda obsoleto en minutos.

La vulnerabilidad estructural es la ruta de reingesta: un gemelo estático podría aislarse por completo, uno vivo no puede por definición. **La característica que constituye la tesis es la misma que abre la superficie de ataque.** El plan de respuesta notifica primero al operador de la instalación real y contempla que la instalación física pueda tener que cambiar. La póliza cubre pérdida financiera, no la consecuencia sobre una instalación. No existe residual cero.

Hallazgo del equipo:

Después del tratamiento, el riesgo residual del programa ya no es técnico: es conceptual y humano. Simulación y diseño, tiempo y legal, y humanos y organizacionales concentran el 57 % del residual. Si el adiestramiento realmente enseña y si la institución lo adopta no son problemas que se reduzcan con ingeniería. Los de ingeniería sí.

6. Programa e inversión:

El cliente fijó un piso de USD 90.000. El levantamiento de abajo hacia arriba de la capacidad descrita arroja una cifra dos órdenes de magnitud mayor, así que la propuesta se presenta en dos capas. **El cliente no arriesga USD 32 millones: arriesga USD 150.000 y tres meses, y decide con evidencia si continúa.** Las seis fases cierran con una puerta que se abre con una medición, no con un informe de avance, y el 44 % del presupuesto no se libera hasta que la seguridad del operador esté certificada por un tercero.

FASE	OBJETIVO	CRITERIO DE PUERTA: QUÉ DEBE MEDIRSE	DIRECTO USD
F1 · 3 m	Cerrar los doce datos abiertos y llevar el diseño a un sitio concreto	Polígono autorizado y decisión documentada sobre el gemelo como objetivo	150.000
F2 · 7 m	Prototipo vertical: gemelo de un sector, IA básica, bancos de prueba	≤ 5 cm RMSE · curva de costo por píxel · 90 % en sentido de pendiente	2.079.750
F3 · 11 m	Gemelo del territorio: 25 ha de alta fidelidad, 140 km^2 de contexto y flota transferida	Precisión en el polígono y reingesta ejecutada por el cliente	5.234.680
F4 · 10 m	Oposición adaptativa, motor generativo, perfilado y gemelo hidráulico	Origen adjudicado ≤ 60 % a ciegas y cero fallos en 1.000 ciclos con maniquí	5.317.500
F5 · 10 m	Instalación, cuatro cabinas de ocho estaciones, mando e integración	Latencia, estabilidad, seguridad certificada y telemetría al 100 %	11.974.623
F6 · 7 m	Verificación, certificación, transferencia y estudio con grupo control	Diferencia significativa frente a la cohorte control	2.435.500

Presupuesto:

CATEGORÍA	USD	% DEL DIRECTO
1 · Investigación y desarrollo	2.554.000	9,4
2 · Adquisición de datos geoespaciales	1.025.980	3,8
3 · Flota de plataformas aéreas	1.300.200	4,8
4 · Cabinas de inmersión	5.602.823	20,6
5 · Infraestructura de cómputo y red	2.913.000	10,7
6 · Licenciamiento de software	1.214.000	4,5
7 · Talento humano · 1.480 FTE-mes, pico de 43	**8.620.750**	**31,7**
8 · Instalación física	2.467.300	9,1
9 · Legal, certificación y cumplimiento	1.444.000	5,3
Subtotal directo	**27.192.053**	**100**
11 · Contingencia 17,5 %, ponderada por clase de madurez	4.758.609	
TOTAL PROGRAMA · 48 MESES	**31.950.662**	
10 · Operación año 1, línea separada: no es costo de construcción	2.366.191	

La contingencia no es un número redondo: aplica tasas diferenciadas por riesgo técnico a la composición real 8 % sobre comercial, 15 % sobre adaptación, 35 % sobre I+D propia ponderadas por participación en costo. Se añade un 5 % de reserva de gestión, USD 1.359.603, administrada por el cliente y no incluida arriba. Primas de transferencia y cobertura cambiaria son costo cierto, no reserva: tratarlas con reserva sería pagar dos veces. Conversión referencial a COP 4.050 por dólar, sujeta a la tasa del día de la oferta.

Una cifra derivada, no estimada:

Cabinas de ocho estaciones y no de cuatro. El paso de píxel admisible es función lineal de la distancia de observación: con radio 3,5 m y paso 1,0 mm salen 98 Mpx y 4 estaciones; con radio 5,3 m y paso 1,5 mm, 96 Mpx y 8. Casi el mismo conteo de píxeles, y el paso grueso cuesta bastante menos por metro cuadrado, de modo que la cabina grande duplica las estaciones sin subir el costo de panel y aloja un escuadrón completo. Cuatro cabinas dan 32 estaciones y 70 iteraciones por operador y año, con degradación graciosa si una cae.

Viabilidad, con las dos lecturas:

Medido en **valor de adiestramiento a precio de campo**, las 6.992 iteraciones anuales de escuadrón valdrían USD 125,9 millones en terreno, y el programa se equilibra en 3,1 meses. Medido en **caja desplazada del presupuesto actual**, y dado que no sustituye tiro real ni acondicionamiento, el ahorro neto ronda USD 1,23 millones anuales.

La lectura honesta es la primera: no ahorra sobre lo que hoy se hace, hace asequible algo hoy imposible a cualquier presupuesto. Setenta iteraciones por operador y año no se compran con más dinero: no existe el terreno, ni el tiempo, ni la tolerancia al riesgo, y menos dentro de una central en operación. Para contraste, un simulador de vuelo de nivel D cuesta entre 10 y 18 millones y adiestra a una tripulación en un tipo de aeronave sobre terreno genérico. Los supuestos —ejercicio de campo USD 18.000, cohorte de 800 operadores, 5 repeticiones anuales— dependen de datos que el cliente aún no entrega: el argumento se sostiene en estructura, no en magnitud.

Sensibilidad:

ESCENARIO	EFECTO Y TRATAMIENTO
El dólar sube 15 %	En USD, cero: el 40,6 % importado se contrata en dólares. En pesos, +6,1 %, de COP 129,4 a 137,3 mil millones. Se trata con cobertura cambiaria, no con contingencia
La I+D háptica se retrasa 6 meses	USD 690.000 de retención, 2,2 % del programa. No arrastra el cronograma, y si el retraso se vuelve fallo la cabina ya está diseñada para operar sin suspensión
Se reduce a dos cabinas	**USD 28,40 millones. Y el costo: el aforo cae a 7,0×, por debajo del 10× que exige el criterio de éxito.** Con tres cabinas queda en 10,5×, justo en el umbral y sin margen

7. Método, verificación y equipo:

El método proyectual aplicado:

Los once pasos del método de Bruno Munari se ejecutaron sobre este encargo. La tabla indica la salida concreta de cada uno.

#	PASO	SALIDA PRODUCIDA
1	Problema	El problema no es representar terreno: el ciclo de aprendizaje está roto en costo, memoria y adversario
2	Definición	10 inclusiones, 10 exclusiones, tres usuarios, tipología elegida por matriz ponderada, 11 criterios de éxito con umbral
3	Elementos	24 subproblemas con dominio, criticidad, dependencias y responsable funcional
4	Recopilación	Referentes, datos técnicos, práctica del usuario y normativa. 12 datos solicitados formalmente al cliente
5	Análisis	Cinco hallazgos con decisión asociada, cuatro matrices ponderadas y **15 restricciones duras que filtran el paso siguiente**
6	Creatividad	Concepto rector, cinco subsistemas y flujo desde intención. De 31 conceptos generados, 19 se eliminaron por vulnerar una restricción
7	Materiales	41 componentes: 24 comerciales, 9 de adaptación, 8 de I+D propia, más estándares de interoperabilidad
8	Experimentación	12 experimentos con hipótesis falsable y **criterio de abandono**. Uno ejecutado: el nivel en WarGamesDesign, con tres hallazgos desfavorables incorporados
9	Modelos	Cinco modelos escalonados por fidelidad y un modelo de datos con gobierno por capas
10	Verificación	17 criterios con umbral fijado antes de la prueba y responsable nominal
11	Solución	Trazabilidad explícita de cada subproblema al subsistema que lo resuelve

Dónde se modificó el método, y por qué:

Munari advierte que su método no es un valor absoluto ni definitivo, y que puede alterarse si se encuentran otros valores objetivos que mejoren el proceso. Se alteró en tres puntos. **Primero**, el paso 5 se obligó a emitir un artefacto vinculante que el método no contempla, las quince restricciones duras: el valor objetivo es la auditabilidad, porque los conceptos se eliminaron por regla y no por opinión. **Segundo**, cada experimento lleva criterio de abandono, para impedir que un resultado negativo se reinterprete hasta volverse favorable. **Tercero, y es la alteración de fondo**: el experimento del nivel se ejecutó antes del paso 6, y sus tres hallazgos desfavorables moldearon el concepto. Documentarlo en su lugar canónico habría ocultado ese orden. **Declarar la alteración vale más que fingir la secuencia.**

Verificación:

CRITERIO	UMBRAL DE ACEPTACIÓN	RESPONSABLE
Precisión geométrica	≤ 5 cm RMSE en superficies de interacción táctica	Jefe de Geomática
Latencia y credibilidad	≤ 20 ms motor-a-fotón en percentil 99 · adjudicación de origen ≤ 60 % en evaluación ciega	Tiempo Real y Oficial Doctrinal
Fidelidad háptica	Correlación ≥ 0,80 entre esfuerzo percibido y real; sentido de pendiente ≥ 90 %	Factores Humanos

Seguridad del operador	**Cero incidentes con lesión. Cero fallos de parada.** No hay umbral distinto de cero	**Seguridad Industrial**, fuera de la línea de producción
Carga cognitiva	Dentro de banda productiva, verificada en ambos extremos	Factores Humanos
Transferencia al terreno real	Diferencia significativa ($p < 0,05$) frente a cohorte control	**El cliente**, no el proveedor
Telemetría y disponibilidad	100 % de eventos registrados; ≥ 95 % en ventana programada	Analítica y Operaciones
Cumplimiento normativo	Cero hallazgos críticos en auditoría externa	Jurídica y auditor externo

Tres criterios se verifican deliberadamente fuera de la línea de producción, por la misma razón: quien construye no puede ser quien certifica que lo construido es seguro, transferible o legal. Si la verificación falla, ocho subsistemas tienen plan de repliegue declarado. **Uno no lo tiene, y la ausencia es deliberada**: si la decisión no se registra, el programa reproduce el costo de olvido con mejor gráfica y mayor precio.

Equipo:

INTEGRANTE	ROL	APORTE VERIFICABLE
Jose Ávila	Dirección de diseño de simulación	Reformulación del problema y del alcance. Identificó la referencia fotogramétrica que origina la propuesta
Thomas Campuzano	Arquitectura del gemelo y ciclo del dato	Arquitectura de capas con vida útil declarada y bloqueo activo. Definió el hilo digital
Laura Kamila Rubiano	Núcleo de IA y flujo de intención	Traducción de intención a escenario y envolvente doctrinal de la oposición
Mariana León	Diseño de escenario táctico	Construyó Operación Compuerta en WarGamesDesign y condujo la lectura estructurada del experimento
María José Carreño	Producción ejecutiva y presupuesto	Modelo de costo de abajo hacia arriba y derivación de la reserva por clase de madurez

Declaración de uso de inteligencia artificial:

Dónde se usó: investigación, estructuración y redacción, con síntesis de referencias técnicas y normativas, exploración de alternativas antes de someterlas a las matrices, construcción de tablas y del modelo de cálculo del presupuesto.

Dónde no: Operación Compuerta la construyó el equipo en WarGamesDesign, y la lectura del experimento sobre sus cuatro ejes la hicieron cuatro integrantes; los tres hallazgos desfavorables salen de esa observación directa.

Dónde decidió el criterio humano: el alcance, la tipología de entorno, las quince restricciones duras, la exclusión de la suspensión magnética de la ruta crítica, la decisión de no unificar las dos vistas y los umbrales de verificación, fijados antes de conocer resultado alguno. **Verificación:** lo que no pudo confirmarse quedó marcado como pendiente de verificación con la fuente a consultar, en lugar de completarse con un valor plausible. El equipo asume la responsabilidad íntegra por el contenido, incluidos sus errores.

Fentes:

Fuentes. Munari, B. (2016). ¿Cómo nacen los objetos? Apuntes para una metodología proyectual. Gustavo Gili, obra original de 1981 · Congreso de la República de Colombia, Ley 1581 de 2012 y Ley 1712 de 2014 · Aeronáutica Civil, RAC 100 · IGAC, MAGNA-SIRGAS · IEEE 1278.1 y 1516 · SISO: CIGI, MSDL, C2SIM · OGC: 3D Tiles y CDB · Hart y Staveland (1988), NASA-TLX · Borg (1998).