



ARTÍCULO 3

INTEGRACIÓN CIUDAD PUERTO EN TALCAHUANO

Modelo de simulación interactiva
para la planificación urbana y logística

INTEGRACIÓN CIUDAD PUERTO EN TALCAHUANO

Modelo de simulación interactiva para la planificación urbana y logística



Jordy Cárcamo, Helen De la Fuente^{*}, Diego Ramírez, Nicolás Rojas, Miguel Higuera y Paula Vivallos.

RESUMEN: Este artículo presenta el diseño, desarrollo e implementación de la plataforma *Ciudad Portuaria*, una herramienta web interactiva para la planificación integrada en contextos de interfaz ciudad-puerto. La plataforma fue desarrollada a partir de un proceso participativo que identificó necesidades territoriales clave, sobre las cuales se diseñó una arquitectura tecnológica basada en software de código abierto, utilizando React, TypeScript, Django y PostGIS. El sistema integra cinco macroindicadores espaciales: calidad de espacios urbanos, tiempos de viaje, diversidad de usos de suelo, proximidad a transporte público y eficiencia logística de carga. La arquitectura modular permite la creación, modificación y comparación de escenarios urbano-portuarios mediante la edición de geometrías y datos, con recálculo dinámico de indicadores y visualización interactiva en mapas y gráficos en tiempo real. La implementación piloto en Talcahuano, Chile, incluyó la modelación de nueve proyectos de infraestructura y validación con 83 usuarios entre actores comunitarios, sector público y privado durante el período comprendido entre marzo y agosto de 2025. Los resultados demuestran que la plataforma facilita la evaluación comparativa de intervenciones territoriales y apoya procesos de toma de decisiones participativas. Se discuten las ventajas técnicas de la herramienta, sus limitaciones operativas y su potencial de replicabilidad en otras ciudades portuarias que enfrentan desafíos similares de integración urbana y logística.

*** AUTOR CORRESPONDIENTE**

helen.delafuente@citylabbiobio.cl

RG|37

Palabras claves: Ciudad-Puerto, Plataforma digital, Planificación urbana, Sistemas de información geográfica, Herramientas participativas

INTRODUCCIÓN

El fenómeno ciudad-puerto se manifiesta en diversas regiones del mundo y ha generado profundas transformaciones en las ciudades costeras. En sus orígenes, puerto y ciudad estaban estrechamente vinculados: las ciudades portuarias eran centros comerciales dinámicos y espacios de vida y ocio para comerciantes y trabajadores del transporte marítimo. Sin embargo, con la industrialización, esta relación comenzó a fracturarse, siendo históricamente tanto fructífera como problemática (Fedele y Domínguez, 2015).

A partir de la década de 1960, muchas ciudades construyeron nuevos puertos más alejados de los centros urbanos, y el transporte marítimo industrial adquirió un rol central. En ese proceso, la planificación portuaria se desvinculó de la planificación urbana, generando una creciente desconexión entre ambas dimensiones del territorio (Hein, 2016). Ejemplo de ello, en ciudades chilenas, el área portuaria se encuentra desarticulada de la ciudad, en muchos casos la infraestructura portuaria se encuentra distante de los centros urbanos y cercada, impidiendo el contacto cotidiano de los habitantes con el puerto (Loaiza Valencia & Alarcón Rodríguez, 2022). De esta manera, la impronta que construyen los puertos en sus habitantes encuentra sentido en un paisaje marcado territorialmente por los flujos de transporte que allí transcurren.

Las ciudades portuarias constituyen, por tanto, un objeto de estudio complejo que abarca no sólo estructuras físicas, flujos de mercancías, trabajadores y personas de la sociedad civil, sino que también dimensiones intangibles como la construcción de identidad social, política y territorial, elevando la discusión más allá de un lugar donde los modos de transporte cambian de los sistemas terrestres a los sistemas marítimos (Iglesias et al., 2010). Desde una mirada paralela, la relación puerto-ciudad es un elemento crítico en el sistema global de comercio y transporte marítimo, un facilitador importante en la vida económica de la mayoría de los países

y un foco de actividad a escala local, nacional e internacional (Alemany & Bruttomesso, 2022).

Esta complejidad ha impulsado el estudio de distintos modelos para analizar la evolución y configuración de los sistemas ciudad-puerto. Bird (1963) concibe el desarrollo portuario en tres fases: establecimiento, expansión y especialización. En la primera, la ciudad y el puerto mantienen una relación íntima; en la segunda, la expansión asociada a la Revolución Industrial impulsa el crecimiento del puerto, pero también marca distanciamiento físico y funcional respecto a la ciudad; en la tercera fase, la separación se intensifica debido a cambios operacionales y espaciales del sistema portuario. Otros autores han ampliado esta visión incorporando dimensiones más territoriales y funcionales. Ducruet y Lee (2006) propusieron un marco de análisis basado en la combinación de centralidad urbana e intermediación portuaria, identificando variados tipos de ciudades portuarias según su grado de equilibrio entre ambas funciones.

En el debate actual, las relaciones ciudad-puerto están orientadas hacia la integración y el carácter mixto. Según la Asociación Internacional de Ciudades y Puertos (AIVP), la permanencia del puerto activo en la ciudad exige superar la lógica de separación y promover estrategias de cooperación, haciendo un llamado a “Hacer ciudad con el Puerto”. Este enfoque plantea la ciudad-puerto como un espacio de innovación capaz de enfrentar los desafíos de movilidad, energía y resiliencia climática, al tiempo que refuerza la identidad y vitalidad urbana (Giordano et al., 2017).

En esta misma línea, la agenda propuesta por Sabino et al. (2025) primero reconoce a las Ciudades Puerto como un laboratorio de innovación, donde es posible probar métodos participativos, como los juegos de simulación, las metodologías de previsión y las plataformas digitales colaborativas como una herramienta que favorece la comunicación transparente entre actores, a la vez que fomentan la confianza y el entendimiento mutuo.

La planificación de intervenciones a largo plazo en ciudades puerto exige a los equipos técnicos en primera instancia, asumir un fuerte proceso de digitalización que permita identificar oportunidades tecnológicas emergentes, que generen valor tanto para autoridades portuarias como a las partes interesadas en la planificación de la ciudad, anticipando las dinámicas del sistema puerto-ciudad (Tsvetkova, et al. 2024; Nugraha et al., 2022). En este contexto, las plataformas digitales de simulación espacial se transforman en instrumentos clave para evaluar escenarios alternativos, visualizar impactos territoriales y facilitar procesos participativos de toma de decisiones (Vásquez, et al. 2025).

A nivel internacional, destaca el proyecto Quantum Urbanizable Booster (QUB) del MIT Media Lab, el cual emplea modelos basados en agentes humanizados (h-ABM) junto con técnicas de computación cuántica para acelerar simulaciones urbanas complejas. A través de la interfaz CityScope, esta plataforma permite explorar escenarios dinámicos casi en tiempo real, integrando datos provenientes de múltiples fuentes (tanto públicas como privadas) para optimizar intervenciones en movilidad, uso de suelo y calidad de vida (Alonso Pastor et al., s.f.). No obstante, la diversidad de herramientas disponibles revela dos grupos: aquellas directamente vinculadas a la planificación urbana (como depthMapX) y otras destinadas a funciones complementarias, como modelado energético, econometría espacial o simulaciones basadas en agentes (Yap et al., 2022).

A pesar de estos avances, estas soluciones presentan barreras significativas para su implementación en contextos latinoamericanos: requieren infraestructura computacional de alto costo, dependen de fuentes de datos comerciales no disponibles en la región, y su complejidad técnica limita la participación de actores no especializados en los procesos de planificación. Como resultado, muchas herramientas de planificación urbana se vuelven prohibitivas tanto para municipalidades y organismos públicos locales, además de requerir datos con granularidad temporal y espacial que frecuentemente no están

disponibles en la escala solicitada o dependen de fuentes comerciales. Esto limita su uso a equipos especializados y dificulta la participación de actores comunitarios en los procesos de planificación. Estos factores terminan por convertir estas iniciativas en verdaderas “islas de modernidad”, donde el acceso a datos geográficos abiertos sigue siendo desigual y las plataformas geoespaciales no logran integrarse a una red global más amplia (Ballari et al., 2025).

Como desafío adicional, la construcción de indicadores urbanos y logístico-portuarios requiere de información actualizada sobre flujos de carga, condiciones de tráfico y operaciones portuarias; sin embargo, estos datos rara vez se encuentran consolidados en plataformas accesibles. Esta ausencia de información integrada dificulta avanzar en aspectos clave como la eficiencia logística, la gestión de infraestructura, la optimización de operaciones, así como en la mejora de la sostenibilidad ambiental y energética, la seguridad y el adecuado relacionamiento con el entorno urbano (González-Cancelas et al. 2020). En este contexto, resulta indispensable avanzar hacia la digitalización de procesos y el desarrollo de plataformas inteligentes que permitan recopilar, vincular actores y disponibilizar estos datos de manera accesible y articulada.

En este contexto, el presente artículo tiene por objetivo presentar el desarrollo y validación de la plataforma Ciudad Portuaria, una herramienta web de código abierto diseñada específicamente para apoyar la planificación integrada en contextos de interfaz ciudad-puerto. La plataforma fue desarrollada en colaboración con la Empresa Portuaria Talcahuano - San Vicente y validada en la comuna de Talcahuano, Chile. Actualmente, esta ciudad es la tercera comuna más poblada del Área Metropolitana de Concepción (INE, 2024) y concentra dos terminales portuarios que movilizan más del 50% de la carga nacional (Empresa Portuaria Talcahuano - San Vicente, 2025), estos se consolidaron a partir de la industrialización del siglo XX, impulsando un crecimiento urbano marcado por tensiones de integración (Valverde, 1984).

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la plataforma Ciudad Portuaria se estructuró en cuatro etapas metodológicas:

- **Diseño conceptual basado en diagnóstico participativo**
- **Definición de la arquitectura tecnológica**
- **Implementación de módulos funcionales**
- **Despliegue y validación en terreno**

A continuación, se describe cada una de estas etapas.

• **Diseño conceptual y levantamiento de requerimientos**

El desarrollo de la plataforma se originó a partir de una necesidad identificada por la Empresa Portuaria Talcahuano - San Vicente, orientada a disponer de una herramienta digital que facilitara el diálogo con la comunidad local sobre proyectos de infraestructura portuaria y urbana. A partir de aquello, se diseñó un proceso participativo que incluyó talleres con comunidades y actores locales vinculados al entorno portuario de Talcahuano. Estos talleres permitieron identificar y validar desafíos que surgen en la interfaz ciudad-puerto, los cuales se agruparon en cinco dimensiones: medio ambiente, movilidad urbana, espacio público, seguridad vial y economía local. Este proceso de diagnóstico territorial definió los requerimientos funcionales de la plataforma y orientar la selección de indicadores relevantes para el contexto local (CityLab Biobío, 2024).

A partir de este diagnóstico, se realizó una recopilación y selección de proyectos públicos con impacto potencial en el territorio urbano-portuario. El objetivo fue construir escenarios futuros que permitieran evaluar el efecto de intervenciones planificadas. Entre los proyectos considerados están: Sistema de Teleféricos de Talcahuano, conexión Ruta Interportuaria, Zonas Reguladoras de Frecuencia para el Transporte de Carga, mejoramiento Eje Valdivia, Corredor de Transporte Público Perales-Alessandri, reposición Puente Perales, Plan Maestro de Borde Costero y habilitación del Puente Industrial. La selección de estos proyectos respondió a criterios de relevancia estratégica, disponibilidad de información y potencial de transformación territorial.

• **Definición de indicadores espaciales**

Con base en las problemáticas identificadas, se definieron cinco macroindicadores espaciales para evaluar el impacto de los proyectos sobre el territorio:

a) Calidad de espacios urbanos: Se utilizó el Indicador de Calidad de Espacios Públicos desarrollado por el Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE). El indicador integra cinco componentes: Mantención General, Vegetación, Diversidad de Equipamientos, Seguridad y Accesibilidad Universal (INE, 2020).

b) Tiempos de viaje: Indicador estima la accesibilidad a destinos utilizando el sistema de transporte público. Incluye el tiempo de viaje hacia áreas verdes, servicios de salud, establecimientos educacionales y destinos definidos por los usuarios. Los cálculos se basan en análisis de redes de transporte y procesamiento de información desde la librería OSMnx.

c) Diversidad de usos de suelo: Mide la mixtura funcional del territorio, considerando la presencia y distribución de uso del suelo. Este indicador se calcula mediante el índice de Shannon:

$$-\sum_{i=0}^n p_i \ln(p_i)$$

donde $p_i \ln$ representa la proporción de superficie ocupada por cada uso de suelo i dentro del área analizada. Valores más altos indican mayor diversidad funcional y, potencialmente, mayor vitalidad urbana.

d) Proximidad a paraderos de transporte público: estima el tiempo promedio de caminata desde cada ubicación hacia el paradero más cercano. Se utiliza análisis de redes peatonales, considerando la infraestructura vial disponible.

e) Caracterización del tráfico de carga portuario: caracteriza la circulación del transporte de carga hacia los puertos mediante métricas: velocidad promedio de circulación en las rutas principales (km/h), tiempo de retardo promedio causado por congestión (segundos) y longitud de atascos en tramos críticos (metros). Los datos se obtienen mediante simulaciones de flujo vehicular para escenarios de 100, 300 y 500 camiones.

La información de condiciones de tráfico se consulta a través de la API de Waze for Cities, que proporciona datos históricos y en tiempo real en la red vial.

• Arquitectura tecnológica

La plataforma fue desarrollada utilizando código abierto, lo que permite una mayor flexibilidad para su adaptación. Su arquitectura se compone de frontend, backend y base de datos geoespacial. Actualmente, el sistema se encuentra operativo dentro de las redes internas de ambas organizaciones, Puertos de Talcahuano y CityLab Biobío, y disponible para su visualización en formato físico mediante dispositivos instalados en sus dependencias.

Frontend: Corresponde a la interfaz de interacción de los usuarios, esta se implementó en TypeScript (lenguaje de programación basado en JavaScript) y la biblioteca React (para interfaces dinámicas), incorporando bibliotecas para la visualización de datos geoespaciales como Deck.GL y MapLibre GL JS, esta última para mejorar el rendimiento de mapas interactivos en el navegador web. La gestión del estado interno de la aplicación, es decir, la organización y administración de los datos se realizó mediante la biblioteca Zustand, y la navegación entre vistas de la plataforma se estructuró con React Router.

Backend: Se desarrolló en Python, lenguaje de programación utilizado para desarrollo web y análisis de datos. Para el proceso de autenticación de usuarios (usuario y contraseña) y la comunicación con la base de datos se utilizó el framework Django, que gestiona la lógica de la plataforma. La API REST permite la interacción entre el frontend y el backend, facilitando operaciones de consulta, creación y actualización de escenarios. El servidor maneja solicitudes asíncronas para tareas de cálculo de indicadores, implementando un sistema de polling (método de consultas periódicas al servidor) que permite monitorear el estado de los procesos de cómputo en tiempo real.

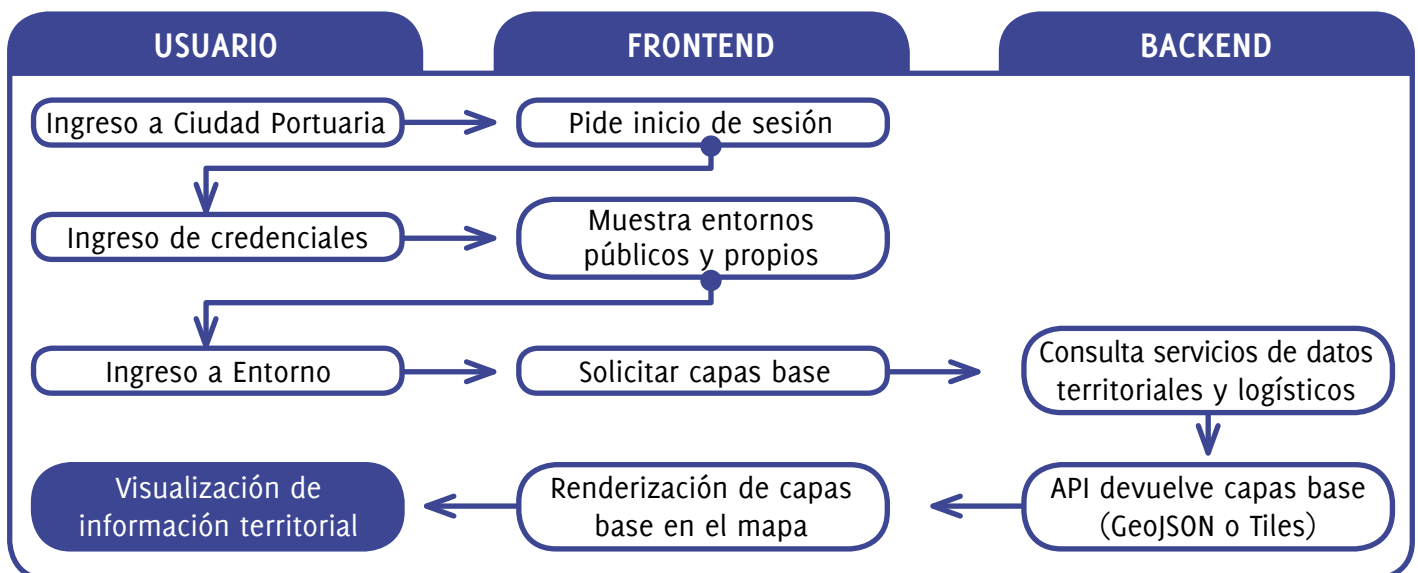
Base de datos: Para el almacenamiento y gestión de los datos relacionales se utilizó el sistema de código abierto PostgreSQL, con la extensión PostGIS para soporte de datos geoespaciales. Esta configuración permite realizar consultas geométricas, operaciones de análisis espacial y almacenamiento de geometrías vectoriales. La base de datos almacena información sobre escenarios, proyectos, capas geoespaciales base y resultados de indicadores calculados.

La comunicación entre distintos componentes del sistema se realiza mediante solicitudes HTTP (Hypertext Transfer Protocol), que es el protocolo estándar utilizado por las aplicaciones web para intercambiar información a través de Internet. Estas solicitudes se guían en la arquitectura REST (Representational State Transfer) para mantener una comunicación ordenada. Para el intercambio de datos se empleó JSON como formato de datos ligero y estructurado. Para las geometrías espaciales, se emplea la extensión GeoJSON, formato estándar ampliamente utilizado en aplicaciones web de mapas interactivos.

La Figura 1 resume de manera conceptual la experiencia de usuario al iniciar sesión en el aplicativo web, describiendo su recorrido a través de la interfaz gráfica y su interacción con los componentes de frontend y backend. El proceso comienza con el acceso a la plataforma y la autenticación mediante credenciales (usuario y contraseña). Una vez validado el ingreso, se presentan los entornos de trabajo disponibles, que en este caso corresponden únicamente a la comuna de Talcahuano. Dentro de este entorno, el usuario puede visualizar las capas base, realizar consultas de datos y ejecutar el cálculo de indicadores, para finalmente acceder a los distintos escenarios asociados a los proyectos futuros.

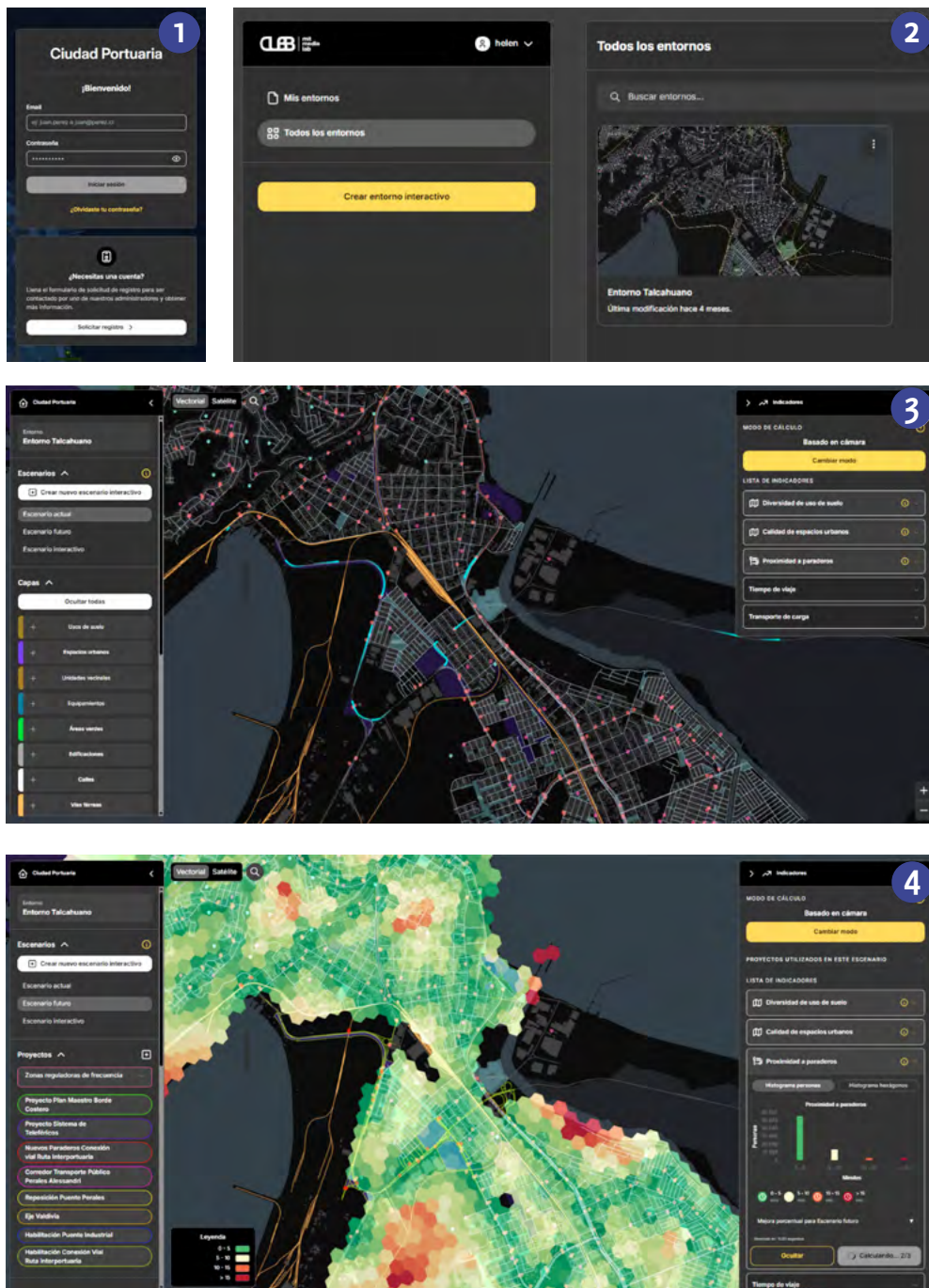
» Figura 1: Visualización de información territorial base.

Fuente: Elaboración propia.



De manera gráfica, en la Figura 2 se muestra la experiencia de usuario y el flujo de trabajo dentro de la plataforma, centrado en cuatro grandes pasos:

- 1 Ingreso a Ciudad Portuaria a través de usuario y contraseña
- 2 Selección de entornos de trabajo disponibles
- 3 Visualización de capas geoespaciales para un escenario base actual
- 4 Resultado del cálculo de indicadores considerando los proyectos futuros a ejecutar en Talcahuano



» Figura 2: Interfaz de usuario Ciudad Portuaria.

Fuente: Elaboración propia.

• Implementación de módulos funcionales

La plataforma se estructura en cuatro módulos funcionales que permiten la interacción del usuario con las diferentes herramientas desarrolladas:

a) Módulo de gestión de escenarios: Permite a los usuarios crear, modificar y comparar escenarios urbano-portuarios. Cada escenario constituye una configuración específica del territorio. Los usuarios pueden activar o desactivar proyectos individuales para evaluar su impacto diferencial.

b) Módulo de edición geométrica: Permite la creación y modificación de geometrías espaciales sobre el mapa. La plataforma soporta puntos, líneas y polígonos. Los usuarios pueden agregar puntos y polígonos que representan nuevos; y líneas que representan nuevas vías. Los cambios se incorporan automáticamente en los cálculos correspondientes.

c) Módulo de cálculo de indicadores: Cuando un usuario solicita el análisis de un escenario, la plataforma ejecuta algoritmos específicos para cada indicador. El proceso se estructura de la siguiente manera:

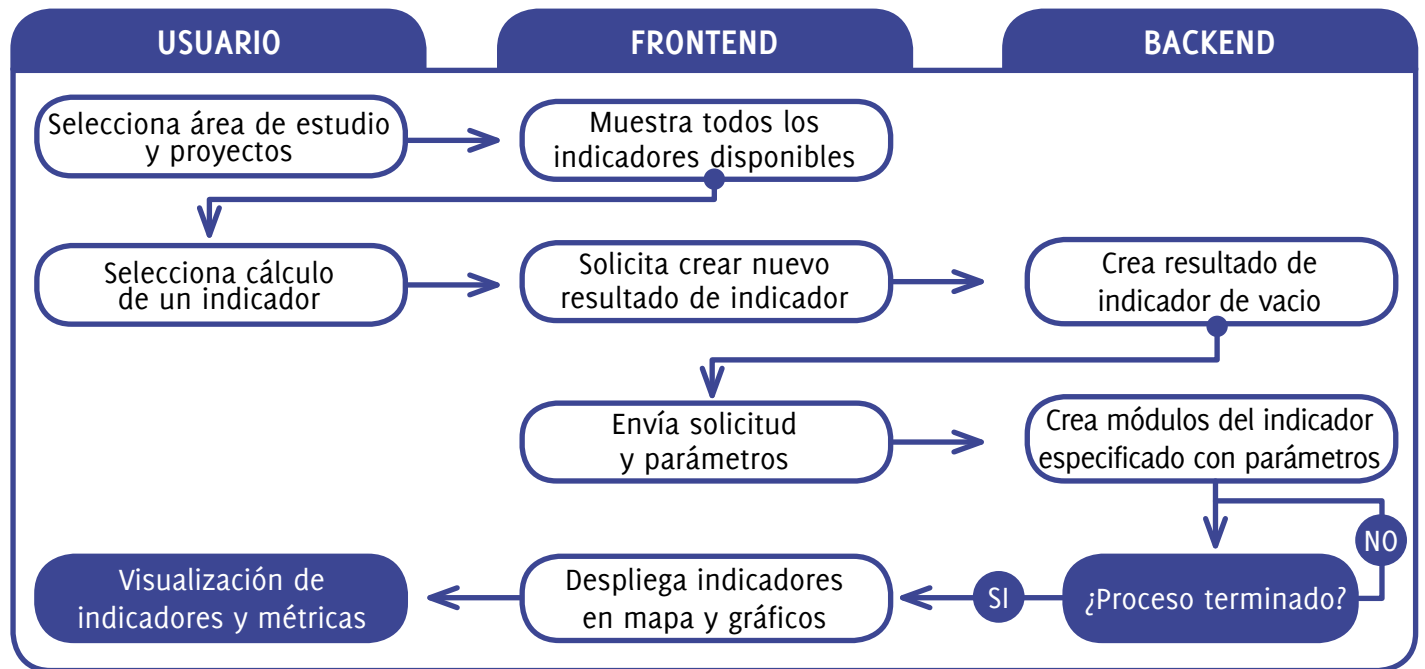
1. El *frontend* envía una solicitud REST a la API, especificando el escenario, el indicador seleccionado y los parámetros de cálculo.
2. El *backend* lanza un proceso paralelo en Python que ejecuta los algoritmos correspondientes.
3. El proceso accede a la base de datos geoespacial para obtener las geometrías y datos necesarios.
4. Se realizan operaciones de análisis espacial (*buffers*, intersecciones, análisis de redes, etc.).
5. Los resultados se almacenan en la base de datos y se notifica al *frontend* mediante el sistema de *polling*.
6. El *frontend* recupera los resultados y actualiza las visualizaciones.

Este flujo permite que el usuario continúe interactuando con la plataforma mientras los cálculos se ejecutan en segundo plano.

De manera esquemática, en la Figura 3, se observa que el proceso de cálculo de indicadores se inicia con la selección de los proyectos involucrados y del barrio o área específica donde se desea evaluar los impactos. Posteriormente, se elige el conjunto de indicadores disponibles para dicha evaluación. Con estos parámetros, el sistema envía la solicitud al servidor para ejecutar el cálculo correspondiente. Una vez finalizado el procesamiento, y mediante consultas periódicas a la base de datos, la plataforma recupera y presenta al usuario la visualización de los indicadores y sus métricas asociadas.

» **Figura 3:** Etapas y procesos de Usuario, Frontend y Backend para el cálculo de indicadores.

Fuente: Elaboración propia.



d) Módulo de visualización y comparación:

Las capas geospaciales se renderizan sobre el mapa base utilizando esquemas de color que facilitan la interpretación de variaciones espaciales. Los gráficos (barras, radar, líneas) permiten comparar cuantitativamente distintos escenarios y analizar la distribución poblacional según rangos de cada indicador.

• Despliegue, implementación física y protocolo de validación

En el período de implementación (mayo-agosto 2015) de la interfaz física se realizaron sesiones de capacitación y uso con 83 participantes pertenecientes a juntas de vecinos, funcionarios del sector público y actores del sector privado en Oficinas de Puertos de Talcahuano.

ESTRUCTURA DE LAS SESIONES DE VALIDACIÓN: Las sesiones de trabajo se estructuraron en cuatro actividades: (1) presentación de la plataforma y sus funcionalidades, (2) exploración guiada de escenarios pre-configurados, (3) ejercicios de creación de escenarios por parte de los participantes, y (4)

discusión de resultados y retroalimentación sobre la herramienta. Cada sesión tuvo una duración entre 60 y 90 minutos, con grupos de 6 a 10 participantes (83 usuarios totales en 9 sesiones). **RI45**

INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN: Al finalizar cada sesión, los participantes completaron un cuestionario que mide: (a) facilidad de uso general, utilizando escala Likert de 5 puntos (Likert, 1932), donde 1=muy difícil y 5=muy fácil; (b) utilidad percibida de cada indicador para la toma de decisiones, utilizando la misma escala donde 1=nada útil y 5=muy útil; y (c) claridad de las visualizaciones cartográficas, mediante preguntas cerradas y espacio para sugerencias de mejora.

EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO TÉCNICO: Se implementó un protocolo de evaluación técnica para monitorear el desempeño de la plataforma bajo condiciones de uso real. Los parámetros evaluados fueron:

a) **Tiempos de respuesta:** Se midió el tiempo de carga inicial de la aplicación y visualización de capas base utilizando las herramientas de

desarrollo de navegador (Chrome DevTools). Se adoptó como umbral de aceptabilidad un tiempo inferior a 5 segundos, siguiendo los estándares de usabilidad web establecidos por Nielsen (1993), quien identifica este rango como el límite en el cual los usuarios mantienen la atención sin percibir retrasos significativos en interfaces interactivas.

b) Fluidéz de navegaci3n: Se monitoreó la tasa de actualizaci3n (frames per second, fps) durante operaciones de zoom y desplazamiento sobre el mapa mediante las mismas herramientas de desarrollo. El umbral de 30 fps se estableció como mínimo para garantizar una experiencia visual fluida, siguiendo estándares de interfaces gráficas interactivas (Card et al., 1999).

c) Capacidad de procesamiento: Se realizaron pruebas de carga con usuarios simultáneos (hasta 8 personas) y cálculos paralelos de indicadores para evaluar la estabilidad del sistema en uso

intensivo. Se registró el máximo de procesos paralelos que el servidor podía manejar sin degradaci3n del rendimiento (definida como aumento inferior al 50% en los tiempos de cálculo respecto a ejecuciones individuales).

d) Registro sistemático de incidentes: Se documentaron los errores técnicos ocurridos durante las sesiones, clasificándolos según origen (problemas de conectividad de red, inconsistencias en datos de entrada, errores de código). Este registro permitió identificar patrones de fallo y priorizar correcciones durante las últimas semanas del período de validaci3n.

Esta combinaci3n de evaluaci3n técnica y validaci3n con usuarios permitió obtener una visi3n del desempeño de la plataforma, considerando aspectos de rendimiento computacional como de experiencia de usuario y utilidad percibida para procesos de planificaci3n territorial.

RESULTADOS

En el siguiente apartado, se presentan las capacidades técnicas de la herramienta, su desempeño operativo y los resultados de su validaci3n en las sesiones con usuarios.

• Funcionalidades operativas de la plataforma

La plataforma integra de manera exitosa cuatro módulos, permitiendo a los usuarios transitar desde la conceptualizaci3n de escenarios hasta la visualizaci3n comparativa de resultados.

En el **m3dulo de gesti3n de escenarios** se generaron 26 escenarios distintos por parte de los participantes, evidenciando la versatilidad del sistema para explorar combinaciones diversas de intervenciones.

En el módulo de edici3n geométrica la plataforma procesó la creaci3n de 28 geometrías (18 polígonos entre áreas verdes y edificaciones, 8 puntos de paraderos y equipamientos, y 2 líneas de vías proyectadas). Las nuevas geometrías se integraron eficaz en los cálculos de indicadores, sin embargo, las líneas solo cumplieron funci3n exclusivamente visual y no pudieron considerarse en cálculos de indicadores, tal como fue documentado por los usuarios durante las sesiones de retroalimentaci3n, lo que significa una oportunidad de mejora para el sistema.

El módulo de cálculo de indicadores en términos generales, el procesamiento de indicadores es adecuado, siendo respaldado por la Tabla 1, que presenta los tiempos promedio de cálculo registrados para cada indicador en el caso de Talcahuano:

» **Tabla 1:** Tiempos de cálculo promedio por indicador.

Nota: Tiempos medidos en escenarios con 15,247 unidades espaciales de análisis (manzanas censales del área de estudio).

Fuente: Elaboración propia.

INDICADOR	TIEMPO PROMEDIO (SEGUNDOS)	OPERACIONES ESPACIALES PRINCIPALES
Calidad de espacios urbanos	9 seg	Intersección de los hexágonos H3 de capa actual y futura de espacios públicos Plazas y Parques, INE, proyecto “Catastro de Calidad de Áreas Verdes”.
Tiempos de viaje	8 seg	Búsqueda de camino más óptimo en red de transporte caminata y red vial. Cálculo de distancias de puntos origen- destino entre redes.
Diversidad de usos de suelo	9 seg	Intersección de hexágonos H3 ponderando área de ocupación de cada uso
Proximidad a Paraderos	12,8 seg	Distancia en la red de caminata hacia paraderos, asignándole valor a los hexágonos H3
Tráfico de carga portuaria	4 seg	Estimación de rutas permitidas en base a información proporcionada por Puertos Talcahuano y simulación de cantidad de camiones y velocidades según tipo de vía

RI47

En cuanto a la incorporación de nuevos indicadores, en desarrollos futuros es posible ampliar el conjunto existente, dado la versatilidad de la plataforma.

En el **módulo de visualización y comparación** durante las sesiones de validación, el 78% de los usuarios (65 de 83) reportaron que la visualización cartográfica fue “clara” o “muy clara”, mientras que el 12% solicitó ajustes en los esquemas de color para mejorar la accesibilidad visual. Las líneas siguientes representan el impacto visual de los indicadores y

resume a grandes rasgos las sugerencias que fueron incorporadas en iteraciones posteriores:

“El indicador de proximidad y los colores son bien intuitivos; rojo para estas zonas alejadas de paraderos o muy escondidas y verde clarito para indicar que estamos cerca para ir a esperar locomoción. Pasa que el indicador de uso de suelo son muchos colores, pero viendo la leyenda se entiende. Esta podría ser más clara y pareja, ya que no hay uno mejor que otro”. Representante de JJVV de la sociedad civil

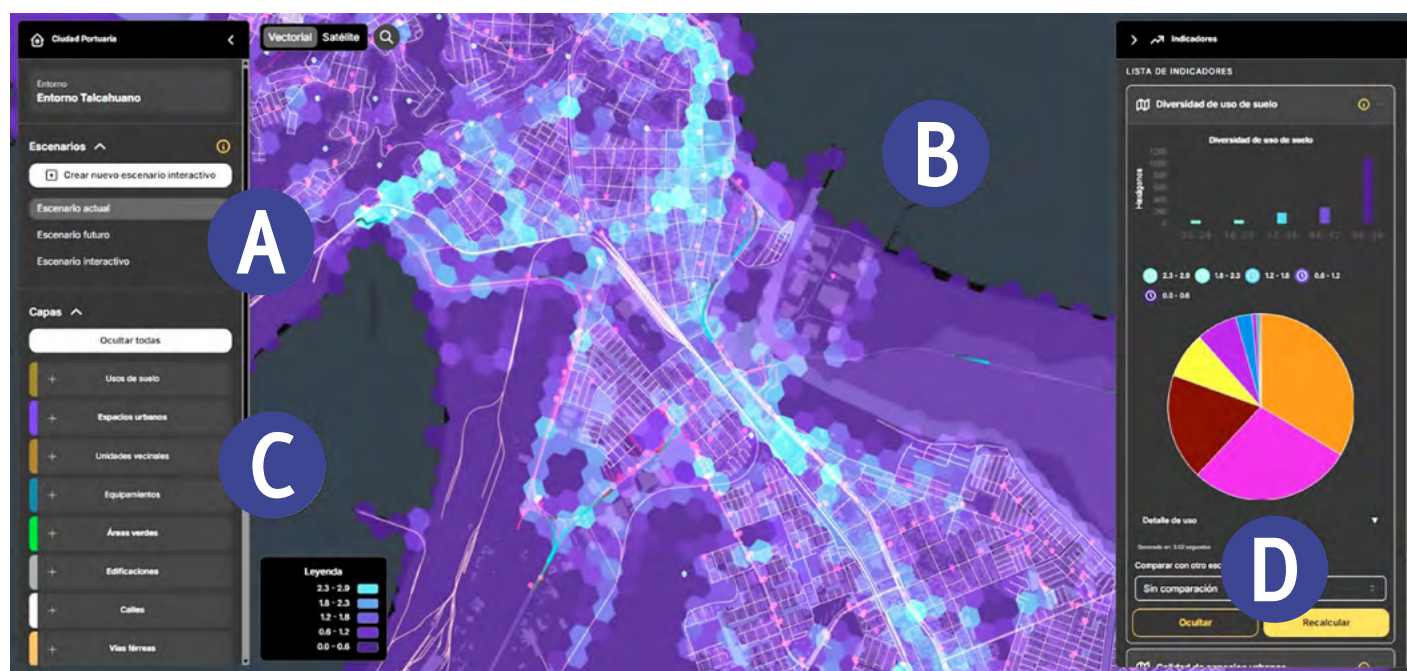
• Interfaz de usuario y experiencia de navegación

La interfaz de la plataforma se estructura en tres áreas: panel lateral de control, vista de mapa central y panel de resultados (Figura 4). El panel lateral con controles de gestión de escenarios, selección de indicadores y activación de proyectos. La vista de mapa permite la interacción con las geometrías mediante herramientas de dibujo y edición. El panel de resultados despliega estadísticos y métricas que se actualizan dinámicamente conforme el usuario modifica los escenarios.

» **Figura 4:** Interfaz Principal plataforma Ciudad Portuaria.

Nota: Se observan: (A) panel de control de escenarios, (B) vista de mapa interactivo con capas geoespaciales, (C) proyectos disponibles, (D) panel de resultados con gráficos comparativos.

Fuente: Elaboración propia.



RG148

La navegación entre vistas se implementó mediante pestañas que organizan las funcionalidades en secciones: "Inicio" (presentación), "Escenarios" (gestión y comparación), "Indicadores" (selección y cálculo), "Mapa" (visualización y edición) y "Resultados" (gráficos y métricas). Esta estructura

modular recibió evaluación positiva durante las sesiones de validación: el 92% de los usuarios logró completar tareas básicas (crear escenario, activar proyecto, calcular indicador) sin asistencia tras una capacitación inicial de 15 minutos.

• Rendimiento técnico y escalabilidad

El desempeño de la plataforma fue evaluado en términos de tiempos de respuesta, capacidad de procesamiento y estabilidad del sistema durante el período de implementación.

TIEMPOS DE RESPUESTA: La carga inicial de la aplicación y visualización de capas base requirió en promedio menor a 5 segundos, tiempo considerado aceptable para aplicaciones web geoespaciales. Las operaciones de navegación (zoom, desplazamiento) mantuvieron una tasa de actualización superior a 30 cuadros por segundo, garantizando una experiencia fluida.

CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO: La arquitectura implementada permitió el procesamiento simultáneo de hasta 5 cálculos de indicadores en paralelo sin degradación significativa del rendimiento. Durante las sesiones de validación con mayor carga (8 usuarios simultáneos), no se registraron fallos del sistema ni tiempos de espera superiores a 120 segundos para el indicador más costoso computacionalmente (tiempos de viaje).

ESTABILIDAD: se registraron 7 incidentes técnicos. De estos, 4 corresponden a problemas de conectividad de red no atribuibles a la plataforma, 2 a inconsistencias en datos de entrada que fueron corregidas mediante validaciones posteriores, y 1 a un error en el algoritmo de cálculo de diversidad de usos de suelo que fue identificado y resuelto durante la segunda semana de implementación.

ESCALABILIDAD ESPACIAL: Si bien la plataforma tiene cobertura comunal de 92 km aproximadamente, su arquitectura fue diseñada para permitir la adaptación a otras escalas territoriales mediante la actualización de capas base y parámetros de análisis. La modularidad del sistema facilita la incorporación de nuevos datos geoespaciales según las características de cada territorio.

• Validación con usuarios y retroalimentación

Mediante el cuestionario de evaluación, los participantes de las sesiones evaluaron la plataforma en base a los parámetros que se detallan a continuación:

USABILIDAD PERCIBIDA: La facilidad de uso general obtuvo una puntuación media de 4.1 (DE=0.8), con diferencias significativas entre grupos: sector público 4.4 (DE=0.6), sector privado 4.3 (DE=0.7), organizaciones comunitarias 3.7 (DE=0.9). Esta variación refleja diferencias en familiaridad previa con herramientas digitales de planificación.

UTILIDAD PERCIBIDA DE LOS INDICADORES: Los indicadores mejor valorados fueron: proximidad a paraderos (4.6), tiempos de viaje (4.5) y calidad de espacios urbanos (4.4). El indicador de tráfico de carga portuario obtuvo menor puntuación entre representantes comunitarios (3.2) pero mayor entre actores del sector privado (4.7), evidenciando perspectivas diferenciadas según el rol del actor.

RI49

CLARIDAD DE LAS VISUALIZACIONES: El 86% de los usuarios consideró que las visualizaciones cartográficas eran claras o muy claras. Las sugerencias de mejora incluyeron: ajustes en paletas de color para facilitar interpretación (mencionado por 10 usuarios), incorporación de leyendas más descriptivas (8 usuarios) y posibilidad de descargar mapas en formato de alta resolución (6 usuarios). Estas observaciones fueron incorporadas en iteraciones durante las últimas tres semanas del período de validación.

CAPACIDAD PARA FACILITAR DISCUSIÓN: Los facilitadores de las sesiones registraron que en el 89% de los casos (8 de 9 sesiones), la plataforma generó discusiones técnicas entre participantes sobre las prioridades de intervención territorial. En 2 sesiones, los usuarios identificaron conflictos no evidentes previamente entre proyectos (por ejemplo, incompatibilidad entre obras de infraestructura portuaria y mejoramiento de espacios públicos en el mismo sector), evidenciando que la herramienta cumplió su objetivo de apoyar procesos de diálogo informado.

» **Figura 5:** Implementación física de la plataforma en las oficinas de la Empresa Portuaria de Talcahuano.

Nota: Las sesiones incluyeron capacitación inicial, exploración guiada de escenarios y ejercicios de creación participativa.

Fuente: Elaboración propia.



RG|50

• Caso demostrativo: aplicación en Talcahuano

Para demostrar las capacidades operativas de la plataforma, se presentan dos ejemplos de análisis realizados con 83 usuarios, mediante la comparación de un escenario actual (2024) con un escenario proyectado que incorpora los nueve proyectos de infraestructura identificados en la etapa de diseño conceptual.

EJEMPLO 1: CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE DIVERSIDAD DE USOS DE SUELO

El módulo de cálculo procesó 15 categorías de uso de suelo distribuidas en 1.646 manzanas censales del área de estudio. El cálculo completo requirió 8 segundos y generó resultados tanto agregados (índice promedio para el área completa) como

desagregados (índice por manzana). La plataforma identificó que el escenario proyectado incrementa el índice de diversidad de 1.63 a 1.72, con aumentos en el borde costero donde se localizan los proyectos del Plan Maestro. Este resultado demuestra la capacidad del sistema para procesar indicadores de entropía espacial y generar visualizaciones que destacan las zonas de mayor transformación funcional.

EJEMPLO 2: ANÁLISIS DE REDISTRIBUCIÓN POBLACIONAL SEGÚN PROXIMIDAD A PARADEROS

La plataforma calculó tiempos de caminata desde cada manzana censal hacia el paradero más cercano, considerando la red peatonal existente y los 22 nuevos paraderos incorporados en el escenario

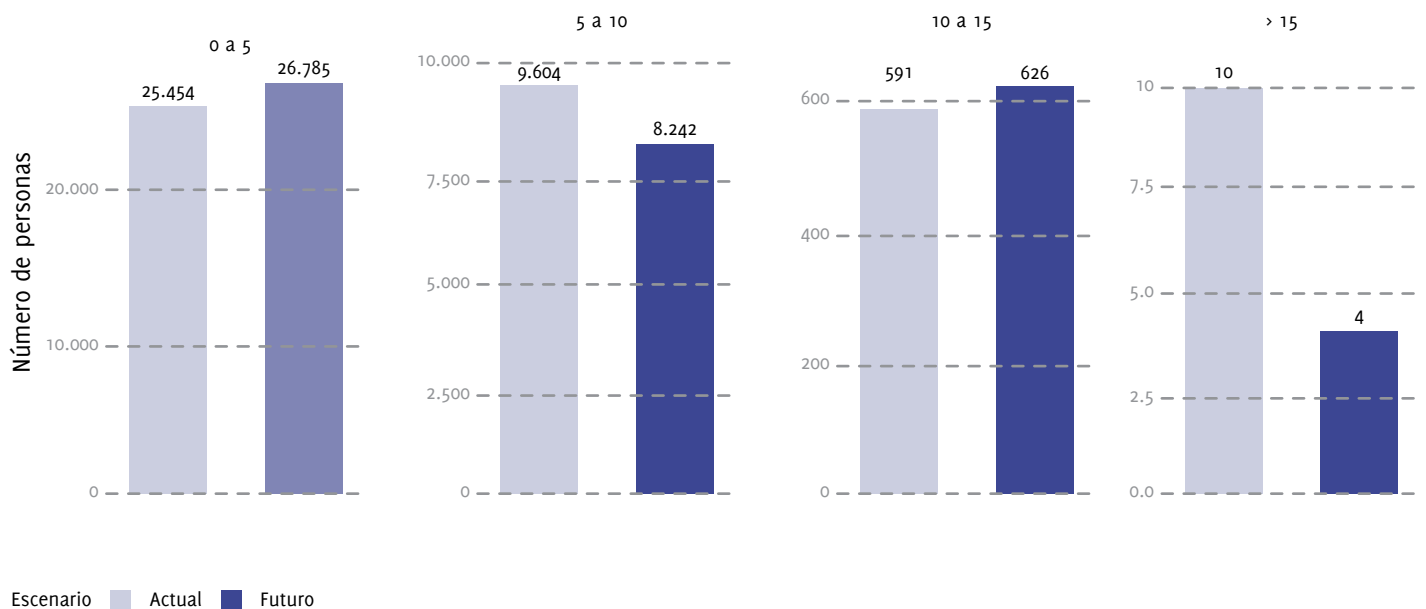
proyectado de la Nueva Ruta Interportuaria y 20 paraderos nuevos en el Corredor Transporte Público Perales Alessandri, lo que representa un aumento del 9,2% de paraderos totales a nivel comunal.

Los resultados muestran una redistribución significativa: la población con acceso en menos de 5 minutos aumenta de 22.454 a 26.785 personas (+4.331), mientras que la población en el rango 5-10 minutos disminuye de 9.604 a 8.242 (-1.362). La Figura 6 ilustra esta redistribución mediante un gráfico de barras comparativo que la plataforma genera automáticamente.

» **Figura 6:** Variación poblacional según los intervalos de tiempo hacia paraderos del transporte público.

Eje X: Intervalo de minutos de viaje.

Fuente: Elaboración propia.



Este ejemplo evidencia la capacidad del módulo de visualización para traducir resultados numéricos en gráficos interpretativos que facilitan la comunicación de impactos territoriales hacia actores no especializados.

DISCUSIÓN

La plataforma *Ciudad Portuaria* se posiciona como una alternativa accesible frente a sistemas avanzados de simulación urbana, ya que fue diseñada para operar con recursos computacionales estándar, datos públicos disponibles y facilitar la participación de actores no especializados. Esta diferencia no implica superioridad técnica, sino un posicionamiento estratégico orientado a las características de ciudades intermedias latinoamericanas, donde municipalidades y organismos de planificación frecuentemente carecen de presupuestos para licencias de software especializado y, sobre todo, el integrar información ya existente. Se busca con esta herramienta contribuir a la planificación urbana estratégica, ya que incluye proyectar la ciudad en el largo plazo, buscando una coherencia entre las intervenciones y buscando y priorizando esfuerzos estratégicos debido a lo limitado de los recursos (CIDEU, 2025).

Respecto al software GIS comercial tradicional, la plataforma ofrece ventajas específicas: interfaz web de instalación local, diseño orientado a comparación iterativa de escenarios, e integración nativa de indicadores urbanos y logístico-portuarios que en herramientas generalistas requieren desarrollo de extensiones más exhaustivas. La capacidad de edición colaborativa con recálculo dinámico permite exploraciones incrementales que se reflejan inmediatamente en visualizaciones, facilitando discusiones técnicas fundamentadas durante sesiones de trabajo.

La implementación evidenció limitaciones técnicas significativas. La más relevante corresponde a la incapacidad de integrar trazados lineales en cálculos de conectividad de red: si bien los usuarios pueden dibujar nuevas vías, estas no se incorporan automáticamente en análisis de accesibilidad, requiriendo pre-procesamiento manual de la topología de red.

La replicabilidad técnica requiere cumplir requisitos de datos mínimos: información censal georeferenciada, capas de red vial y transporte público (OpenStreetMap o fuentes oficiales), usos

de suelo y geometrías de proyectos planificados. La transferibilidad es directa en ciudades portuarias de escala similar (50,000-200,000 habitantes, 1-2 terminales), pero sistemas metropolitanos complejos podrían requerir optimizaciones de rendimiento.

Respecto a dependencias externas, existen vulnerabilidades importantes, el indicador de tráfico de carga depende de la API de Waze for Cities, cuya disponibilidad está sujeta a políticas comerciales; de manera similar, el indicador de calidad urbana depende de actualizaciones periódicas del INE, lo que condiciona su vigencia y consistencia temporal.

En cuanto a la curva de aprendizaje de los usuarios, esta varía significativamente según el perfil: mientras funcionarios públicos y consultores con experiencia en SIG lograron autonomía rápidamente, algunos representantes comunitarios requirieron acompañamiento continuo, evidenciando la necesidad de procesos de capacitación diferenciados.

Los resultados obtenidos en los casos demostrativos evidencian el estrecho vínculo entre proyectos, indicadores y escenarios futuros. En particular, se observa que intervenciones específicas o integrales pueden generar mejoras significativas en la diversidad de usos de suelo, por ejemplo, mediante la incorporación de nuevas áreas verdes, equipamientos deportivos, espacios comerciales o iniciativas turísticas, lo que contribuye a una mayor vitalidad urbana y calidad de vida.

En cuanto al indicador de proximidad a paraderos de transporte público, este fue diseñado para evaluar el impacto de proyectos de vialidad sobre el acceso de la ciudadanía al transporte público, promoviendo la intermodalidad y evitando que los beneficios se orienten exclusivamente al transporte privado o de carga.

Esto demuestra que los indicadores seleccionados y proyectos analizados están vistos desde el impacto a escala del ciudadano, orientando a Puertos de Talcahuano donde las medidas son más eficientes tanto para labores logísticas como para el entorno de las comunidades.

CONCLUSIONES

Se desarrolló e implementó exitosamente la plataforma web Ciudad Portuaria, herramienta digital interactiva que integra cinco indicadores espaciales para la evaluación comparativa de escenarios urbano-portuarios. La arquitectura implementada (React, Django, PostGIS) permite la edición colaborativa de geometrías, el recálculo dinámico de indicadores y la visualización cartográfica de impactos territoriales, convirtiendo la plataforma en una herramienta directa de apoyo a la planificación urbana. La validación con usuarios demostró la viabilidad técnica de la herramienta y su capacidad para facilitar procesos de diálogo basado en evidencia sobre proyectos de infraestructura en la interfaz ciudad-puerto.

La principal contribución de la plataforma radica en tres aspectos: primero, la integración de dimensiones urbanas y logístico-portuarias en una misma interfaz, superando la fragmentación habitual entre instrumentos de planificación urbana y gestión portuaria; segundo, la operación con datos públicos disponibles y recursos computacionales estándar, eliminando barreras de acceso propias del software comercial especializado; tercero, el diseño orientado a la participación de actores no especializados mediante interfaz web accesible y visualizaciones interpretables. Estas características posicionan a Ciudad Portuaria como una alternativa viable para ciudades intermedias latinoamericanas que requieren herramientas de simulación territorial, pero enfrentan limitaciones presupuestarias y técnicas.

Sin embargo, persisten desafíos relevantes. Por un lado, es necesario acelerar los procesos de digitalización portuaria para disponer de datos actualizados que permitan simular impactos urbanos de manera integral. Por otro lado, la operación sostenida de la plataforma

requiere contar con profesionales especializados, responsables de la carga continua de nuevos datos, la incorporación de proyectos adicionales y la actualización o creación de indicadores orientados a medir impactos a escala ciudadana.

Futuras mejoras técnicas deben abordar las limitaciones identificadas durante la implementación: integración de geometrías lineales en cálculos de conectividad de red, implementación de validación topológica automática, optimizaciones de rendimiento para escalabilidad a territorios mayores, y desarrollo de módulos de capacitación diferenciados según perfil de usuario. La replicabilidad en otras ciudades portuarias requiere no solo la transferencia técnica de la plataforma, sino también la adaptación de procesos participativos de diseño, el fortalecimiento de la alfabetización digital y el establecimiento de anclajes institucionales locales que aseguren sostenibilidad en el mediano plazo.

RI53

A pesar de existir experiencias internacionales exitosas de Ciudad-Puerto que orientan la definición de objetivos y propuestas de transformación a nivel general, en cada caso es fundamental analizar las particulares del contexto local (Rete, 2022). La experiencia de Talcahuano demuestra que es posible democratizar el acceso a herramientas avanzadas de planificación territorial cuando el desarrollo tecnológico se articula explícitamente con las capacidades y necesidades del contexto donde será implementado. Para sostener este proceso, es necesario mantener la herramienta operativa, fortalecer redes de colaboración portuaria y difundir entre los distintos actores locales las posibilidades de diálogo que se generan al visualizar información concreta sobre los impactos urbanos asociados a la actividad portuaria

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIVP. (2015). *Guía de buenas prácticas: Hacer la ciudad con el puerto*. Asociación Internacional Ciudades y Puertos (AIVP). https://www.aivp.org/wp-content/uploads/2021/01/AIVP-guia-buenas-practicas-ES_adherent.pdf
- Alemany, J., & Bruttomesso, R. (2022). *La ciudad portuaria del siglo XXI: Nuevos desafíos en la relación puerto-ciudad* [Versión digital]. RETE – Asociación para la Colaboración entre Puertos y Ciudades. <https://retedigital.org/la-ciudad-portuaria-del-siglo-xxi/>
- Alonso Pastor, L. A., Atchade Adelomou, P., & Larson, K. (s.f.). *Quantum Urbanizable Booster (QUB)* [Proyecto de investigación]. MIT Media Lab. <https://www.media.mit.edu/projects/quantum-urbanizable-booster-qub/overview/>
- Ballari, D., Siabato, W., Claramunt, C., Mata, F., Zagal, R., & Franco, R. (2025). *On the development of open geographical data infrastructures in Latin America: Progress and challenges*. *Journal of Spatial Information Science*, (30), pp. 1–28. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2025.30.123>
- Card, S. K., Mackinlay, J. D., & Shneiderman, B. (1999). *Readings in information visualization: using vision to think*. Morgan Kaufmann.
- Centro Iberoamericano de Desarrollo Estratégico Urbano (CIDEU). (2025). *Planificar estratégicamente para transformar la ciudad*. www.cideu.org
- City Lab Biobío. (2024). *Reflexionemos juntos sobre el Talcahuano que soñamos: Primer taller participativo para la construcción de ciudades sostenibles*. City Lab Biobío. <https://citylabbiobio.cl/wp-content/uploads/2024/11/REPORTE-TALCAHUANO.pdf>
- Ducruet, C., & Lee, S. W. (2006). *Frontline soldiers of globalisation: Port-city evolution and regional competition*. *Geojournal*, 67(2), 107-122. <https://doi.org/10.1007/s10708-006-9037-9>
- Empresa Portuaria Talcahuano - San Vicente* (2024). *Memoria integrada 2024*. <https://www.puertotalcahuano.cl/memorias/>
- Fedele, J., & Domínguez Roca, L. J. (2015). *Puerto y ciudad*. *Revista Transporte y Territorio*, (12), pp. 1–15. Universidad de Buenos Aires.
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Academic Press.
- Giordano, R., Pluchinotta, I., Pagano, A., Scricciu, A., & Nanu, F. (2017). *Enhancing water governance capacity with cooperation networks: The case of the Apulia region*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(5), e1141. <https://doi.org/10.1002/wat2.1141>
- González-Cancelas, N., Molina Serrano, B., & Soler Flores, F. (2020). *El impulso de la digitalización de los puertos del Sistema Portuario Español mediante el análisis Business Observation Tool*. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), pp. 338–363. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.650>
- Hein, C. (2016). *Port cities and urban waterfronts: How localized planning ignores water as connector*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), pp. 419–438. <https://doi.org/10.1002/wat2.1141>

Iglesias Fernández, A. M., Alonso Suárez, C., & Turrado Fernández, H. (2010). *El Arco Atlántico: Patrimonio industrial como recurso unificador en las estrategias de desarrollo*. En C. Cornejo Nieto, J. Morán Sáez & J. Prada Trigo (Coords.), *Ciudad, territorio y paisaje: reflexiones para un debate multidisciplinar* pp. 447-468. Compañía Española de Reprografía. <http://hdl.handle.net/10651/11657>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2020). *Indicador de Calidad de Espacios Públicos: Metodología y resultados*. Gobierno de Chile.

Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). *Resultados Censo 2024: Región del Biobío*. Gobierno de Chile.

Likert, R. (1932). *A technique for the measurement of attitudes*. *Archives of Psychology*, 22(140), pp. 1-55.

Loaiza Valencia, D., & Alarcón Rodríguez, M. (2022). *Desarticulación del conjunto ciudad-puerto en sistemas de escala intermedia. Proceso y alternativas para Lebu*, Región del Biobío. *URBE. Arquitectura, Ciudad y Territorio*, (14), pp. 95-113. <https://doi.org/10.29393/UR14-6DCDM20006>

Memoria Chilena. (2024). *Puertos de Talcahuano y San Vicente*. Biblioteca Nacional de Chile. <http://www.memoriachilena.gob.cl/>

RETE. (2022). *La ciudad portuaria del siglo XXI: Nuevos desafíos en la relación puerto-ciudad*. https://retedigital.org/wp-content/uploads/2022/06/RIDmed_Libro-RETE_Full-Issue.pdf

Sabino, M. R., Cabrita, M. do R., Souto Castro, M., Mendes, A., & Pinho, T. (2025). *Building resilience in port-cities: The role of open innovation and innovation ecosystems*. *Discover Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01459-4>

Tsvetkova, A., Chen Zhou, Y., Wahlström, I., Morariu, A.-R., Iancu, B., & Hellström, M. (2024). *Digitalización en puertos RoPax: un marco de categorización para soluciones digitales*. *Maritime Policy & Management*, ahead-of-print, pp. 535-558. <https://doi.org/10.1080/03088839.2024.2436615>

Nugraha, A. T., Waterson, B. J., Blainey, S. P., & Nash, F. J. (2022). *Unravelling the dynamics behind the urban morphology of port-cities using a LUTI model based on cellular automata*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 92, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101733>

Valverde V., G. (1984). *La industrialización de Talcahuano*. *Arquitecturas del Sur*, (3), pp. 7-8. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/AS/article/view/1108>

Vázquez, S. A., Ostermann, F. O., Madureira, A. M. P. S., et al. (2025). *Using a digital participatory platform to evaluate public space quality*. *GeoJournal*, pp. 90, 145. <https://doi.org/10.1007/s10708-025-11383-9>

Yap, W., Janssen, P., & Biljecki, F. (2022). *Free and open source urbanism: Software for urban planning practice*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 96, 101825. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101825>