

MARMARAY Y EL PATRIMONIO CULTURAL Y NATURAL DE ESTAMBUL: EQUILIBRIO ENTRE DESARROLLO Y MEMORIA. UNA LECTURA SITUADA SOBRE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA, PAISAJE Y SOSTENIBILIDAD URBANA¹

VERÓNICA CASANOVAS*

CARLOS HUGO SORIA CÁCERES**

GONZALO ANDRÉS LÓPEZ**

* WHA Consultancy

verocasanovas@gmail.com

** Departamento de Historia, Geografía y Comunicación. Universidad de Burgos

chSORIA@ubu.es (ORCID: 0000-0003-1642-3457)

gandres@ubu.es (ORCID: 0000-0001-9377-8695)

Recibido: 31/10/2025

Aceptado: 20/11/2025

Resumen

El artículo analiza el proyecto ferroviario Marmaray, una de las infraestructuras más significativas y complejas de Turquía, que conecta las zonas europea y asiática de Estambul mediante un sistema de túneles, subterráneos y sumergidos, bajo el estrecho del Bósforo. Desde una lectura situada, se examina su desarrollo como espacio de convergencia entre ingeniería, paisaje y patrimonio, abordando sus dimensiones técnicas, ambientales y culturales. Se estudian los factores geológicos, estructurales y urbanísticos que condicionaron su diseño y ejecución, así como las estrategias implementadas para mitigar los impactos sobre el entorno natural y sobre el patrimonio arqueológico y edificado. La metodología combina la revisión bibliográfica con la observación directa de las obras por parte de la primera autora, en el marco de su experiencia profesional en la coordinación del proyecto y en la gestión de la interacción entre infraestructura y patrimonio. Asimismo, se reflexiona sobre los efectos del crecimiento metropolitano y los marcos normativos de protección del paisaje en un territorio

1 Este manuscrito es una versión en español revisada y ampliada del preprint titulado "The Marmaray Railway Infrastructure: The Challenges of the Heritage Protection before the Growth of Istanbul's Urban Areas", disponible en Preprints.org

caracterizado por la coexistencia de valores históricos y ecológicos. En conjunto, el estudio propone comprender el Marmaray como un laboratorio de equilibrio entre desarrollo, tecnología y memoria, y como un ejemplo paradigmático de sostenibilidad aplicada a las grandes metrópolis contemporáneas.

Palabras clave: Marmaray; Estambul; planificación urbana; sostenibilidad; infraestructura ferroviaria; patrimonio cultural y natural

Abstract

This article analyzes the Marmaray railway project, one of Turkey's most significant and complex infrastructures, which connects the European and Asian sides of Istanbul through a system of tunnels—both underground and immersed—beneath the Bosphorus Strait. From a situated perspective, it examines its development as a space of convergence between engineering, landscape, and heritage, addressing its technical, environmental, and cultural dimensions. The study explores the geological, structural, and urban factors that shaped its design and implementation, as well as the strategies adopted to mitigate impacts on the natural environment and on archaeological and built heritage. The methodology combines a literature review with the first author's direct observation of the works, drawing on her professional experience in project coordination and in managing the interaction between infrastructure and heritage. The article also reflects on the effects of metropolitan growth and the regulatory frameworks for landscape protection in a territory characterized by the coexistence of historical and ecological values. Overall, the study proposes understanding Marmaray as a laboratory for balancing development, technology, and memory, and as a paradigmatic example of sustainability applied to contemporary large metropolitan areas.

Key words: Marmaray; Istanbul; urban planning; sustainability; railway infrastructure; cultural and natural heritage

I. CIUDAD, PROPÓSITO Y MÉTODO: UNA LECTURA SITUADA DEL MARMARAY

Estambul constituye uno de los ejemplos más complejos de transformación urbana contemporánea. Es la única ciudad del mundo asentada entre dos continentes, articulada por el estrecho del Bósforo, y su territorio combina una gran densidad poblacional con una dinámica de crecimiento metropolitano difícil de contener. Esta dualidad ha generado tensiones permanentes entre la expansión urbana, la conservación del patrimonio y la sostenibilidad ambiental. En este contexto se inscribe el presente estudio, que propone una lectura situada del proyecto ferroviario Marmaray como caso paradigmático en la convergencia entre tecnología, paisaje e historia (Christensen, 2017).

Desde hace décadas, la ciudad ha sido objeto de atención por parte de organismos internacionales. En 2011, la UNESCO publicó un informe específico sobre los efectos de la expansión urbana, reconociendo a Estambul como una de las primeras ciudades inscritas en la Lista del Patrimonio Mundial que dispone de

una evaluación detallada de este tipo (UNESCO, 2011). El documento advertía sobre la pérdida de áreas naturales, el incremento de la contaminación atmosférica y acústica y la presión ejercida sobre el patrimonio edificado, factores que ponen en riesgo la integridad cultural y ecológica del territorio. Este diagnóstico marcó un punto de inflexión en la reflexión sobre las relaciones entre desarrollo y conservación en el ámbito urbano.

A partir de ese escenario, la magnitud de los procesos metropolitanos obliga a revisar las estrategias de planificación y a interrogar el papel de las infraestructuras para lograr un equilibrio entre movilidad y sostenibilidad. En ese marco surge el Marmaray, concebido como un sistema ferroviario capaz de unir las zonas europea y asiática, a través de un túnel submarino bajo el Bósforo (Yavuz, 2011). La obra se ha convertido en una referencia internacional tanto por la complejidad de su ejecución como por la interacción entre ingeniería, geografía y patrimonio. Su trazado simboliza una paradoja contemporánea: constituye, al mismo tiempo, una respuesta a los problemas de congestión y una intervención profunda en un entorno de altísimo valor histórico y ambiental.

El análisis planteado en este trabajo aborda el proyecto ferroviario desde una triple perspectiva: técnica, ambiental y patrimonial. Se examinan los condicionantes geológicos y estructurales que orientaron su diseño, las estrategias concebidas para mitigar los impactos sobre el entorno y las medidas implementadas para salvaguardar los hallazgos arqueológicos surgidos durante las excavaciones (DLH, 2010; DLH, 2004). Esta aproximación interdisciplinaria invita a comprender la infraestructura como parte activa del territorio, en diálogo constante con los procesos de transformación que modelan la ciudad. En ese entramado donde el pasado y el presente se superponen, la obra adquiere sentido pleno como reflejo de una relación compleja entre técnica, memoria y paisaje.

La metodología propuesta se basa en la revisión bibliográfica y en la observación directa por parte de la primera autora de este artículo de las obras del Marmaray. Esta experiencia se sustenta en su trabajo desempeñado entre 2011 y 2017, en el marco de la coordinación de las obras y su interacción con el patrimonio cultural y natural. Dichas tareas permitieron la elaboración de un archivo fotográfico detallado, la redacción de informes técnicos y el acceso a documentación especializada, elementos que constituyen la base empírica de esta contribución. El contacto directo con la obra y con los equipos interdisciplinarios de ingenieros, arquitectos y arqueólogos otorgó al estudio un carácter situado, enraizado en la práctica y en la observación prolongada.

El enfoque adoptado se apoya en la noción de lectura situada, entendida como una forma de comprender la infraestructura dentro de su contexto urbano, am-

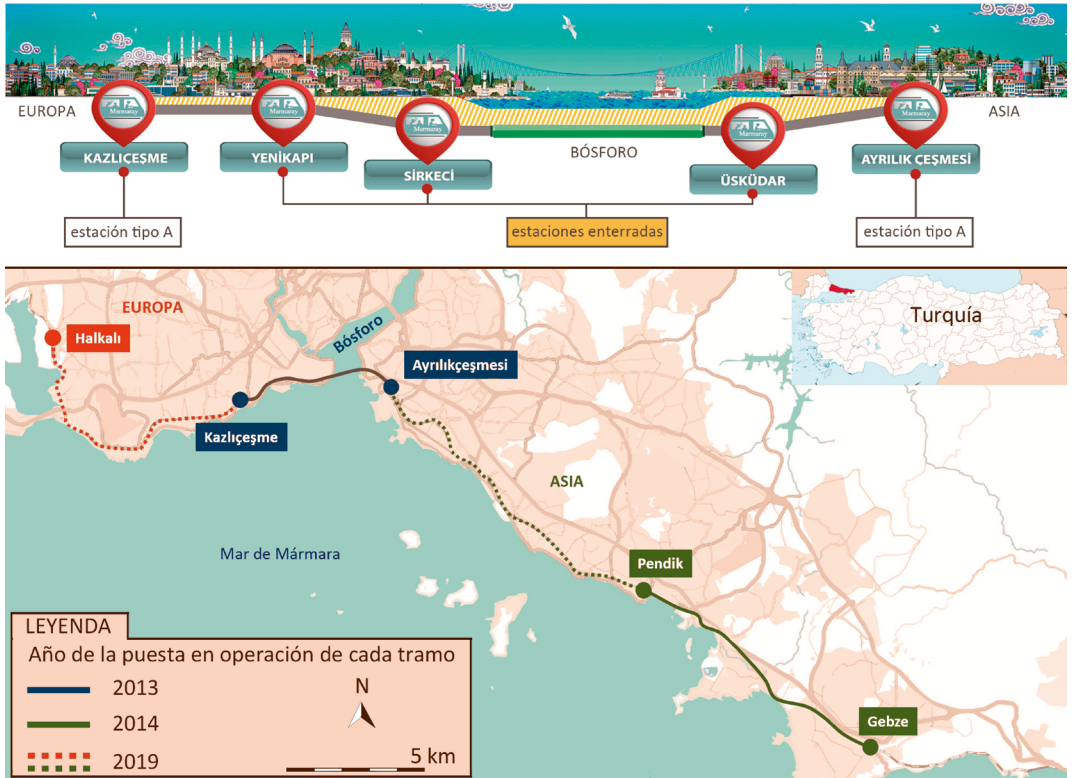
biental y social. Esta aproximación propone un diálogo constante entre la materialidad técnica y los procesos históricos que modelaron el territorio de Estambul. Analizar el Marmaray desde esta óptica significa examinar una obra de ingeniería que atraviesa, literalmente, la memoria de la ciudad: un sistema ferroviario que enlaza siglos de historia bajo la superficie contemporánea.

El desarrollo técnico del Marmaray supuso un proceso de innovación constante, condicionado por la complejidad geológica del estrecho y la densidad urbana del entorno. Las decisiones de diseño, la elección de materiales y los métodos constructivos se aplicaron a lo largo de toda la traza ferroviaria, que combina un tramo subterráneo y dos en superficie, en los sectores europeo y asiático, tal como se muestra en la Figura 1. Cada avance técnico se articuló con una reflexión sobre el impacto ambiental y sobre la manera en que la ingeniería puede convivir con la historia y el paisaje.

Dicha intervención abarcó el conjunto del sistema ferroviario: estaciones, edificios técnicos, talleres y cocheras. Todas las vías fueron de nueva construcción, reemplazando la antigua línea de cercanías que recorría la ciudad. El nuevo trazado incorporó tres raíles, dos dedicados al servicio de trenes suburbanos y uno reservado al tráfico de alta velocidad e interurbano, con una tecnología integralmente renovada y adaptada a los estándares del siglo XXI (DLH, 2010; DLH 2004). Estas obras transformaron la estructura ferroviaria y produjeron un impacto significativo sobre la trama urbana existente, donde las excavaciones de cimentación y los movimientos de tierra generaron, en numerosos puntos, el hallazgo de restos arqueológicos de gran valor. Cabe mencionar que estos descubrimientos, aunque no constituyen el objeto de análisis de este estudio, ilustran la riqueza y la complejidad patrimonial de Estambul, así como la dimensión cultural que subyace en una obra concebida para unir dos continentes a través de la ingeniería y la memoria.

Bajo la superficie técnica se revela la fragilidad de una ciudad construida sobre sus propias huellas. Cada perforación atraviesa capas de tiempo; cada túnel, un diálogo entre épocas. Tanto la excavación bajo el Bósforo, como el resto de la obra, implicó un ejercicio de equilibrio entre innovación tecnológica y respeto patrimonial. La gestión de los hallazgos arqueológicos encontrados a lo largo de la traza exigió una coordinación constante entre ingenieros, arquitectos, arqueólogos, consultores históricos y planificadores urbanos, configurando un modelo de cooperación interdisciplinar de gran valor metodológico (Başgelen et al., 2013).

Figura 1. Esquema longitudinal del sistema ferroviario del Marmaray: tramos enterrados y de superficie.



Fuente: elaboración de Verónica Casanovas, a partir de los pliegos de condiciones de los contratos BC1 (DLH, 2004) y CR3 (DLH, 2010), *Railway Gazette International* y *Metro Istanbul* (2016), y adaptada del preprint Casanovas et al. (2023).

En este sentido, el estudio del Marmaray se presenta como una oportunidad para reflexionar sobre la relación entre desarrollo y preservación, y sobre la capacidad de la planificación urbana para integrar infraestructuras de gran escala sin comprometer la identidad del territorio. ¿Puede una infraestructura ferroviaria convertirse en un agente de armonía entre naturaleza y progreso? ¿De qué manera una metrópolis que crece sobre sí misma conserva la memoria de su territorio? ¿Hasta qué punto la tecnología puede reconciliarse con la historia y con el paisaje que la rodea?

II. LA EXPANSIÓN VERTIGINOSA DEL TEJIDO URBANO DE ESTAMBUL

La historia reciente de Estambul revela un proceso de crecimiento urbano acelerado que ha transformado profundamente su estructura territorial. En pocas décadas, la metrópolis ha pasado de mantener un frágil equilibrio entre sus áreas naturales y sus sectores históricos a convertirse en un organismo que se extiende de forma continua sobre ambas orillas del Bósforo, multiplicando su tamaño y su complejidad. Los primeros asentamientos, fundados en el siglo VII a. C. por colonos griegos procedentes de Megara, se localizaron en un punto de encuentro entre mares y continentes. Su emplazamiento, en la entrada del mar Negro, definió desde el inicio el destino estratégico de la ciudad como espacio de intercambio cultural, político y comercial. Con el paso de los siglos, esta posición geoestratégica determinó tanto su vocación imperial como la densidad patrimonial que caracteriza su paisaje (Emden, 2009).

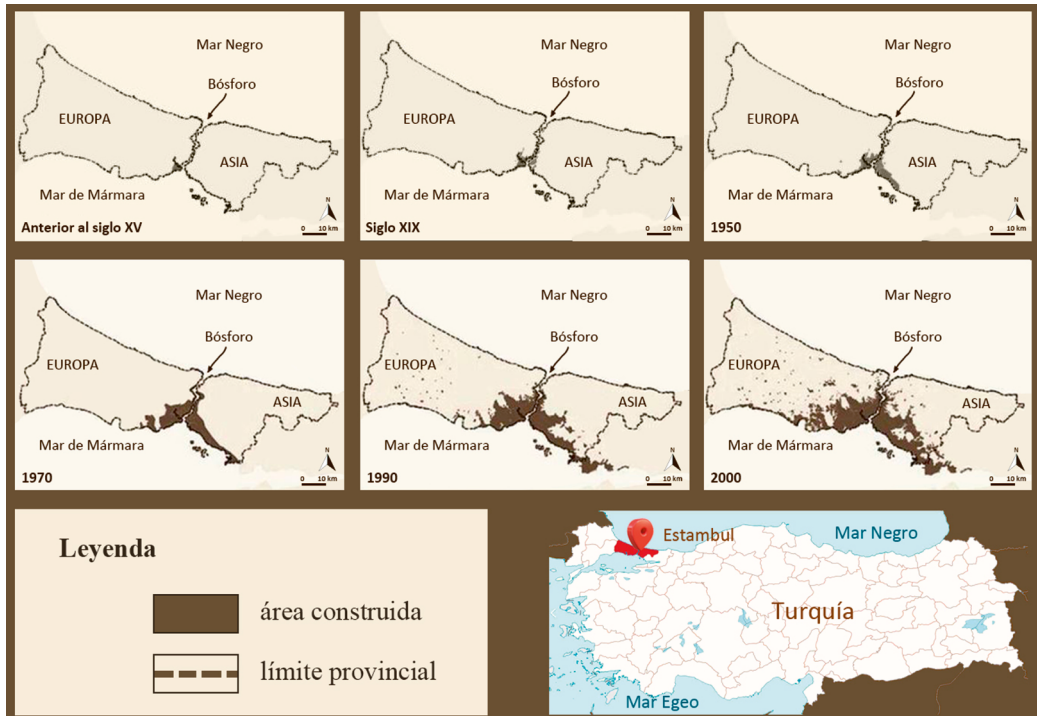
La expansión moderna adquirió un ritmo vertiginoso a partir de mediados del siglo XX. Desde 1950, el desarrollo industrial, el incremento demográfico y la modernización de los sistemas de transporte impulsaron un proceso de urbanización que modificó de manera radical la relación entre la ciudad y su entorno natural. En este periodo pueden distinguirse cuatro grandes fases que ilustran la magnitud de los cambios (Karpát, 2004).

Entre 1950 y 1980 se consolidó una ciudad industrial marcada por el crecimiento de asentamientos informales (*gecekondu*) y por la construcción del primer puente sobre el canal. Durante la década de 1980, la descentralización progresiva de las áreas fabriles y la inauguración del segundo puente intensificaron la expansión hacia las zonas periféricas. Entre 1990 y 2000, la mejora de las redes viarias favoreció el avance del tejido urbano hacia el norte, presionando las cuencas fluviales y las áreas boscosas. Finalmente, en los primeros años del siglo XXI, el crecimiento adoptó una escala metropolitana, acompañada por megaproyectos que redefinieron la estructura territorial: el nuevo aeropuerto de la zona europea, que acabaría sustituyendo al de Atatürk; el tercer puente, el túnel de tráfico rodado *Euroasian Tunnel* y el sistema ferroviario intercontinental, integrado por tres vías, dos destinadas al servicio de cercanías y una tercera reservada a trenes de alta velocidad e interurbano, cuya conexión entre continentes se articula a través del Marmaray (Emden, 2009).

Este proceso de urbanización acelerada convirtió a la ciudad en un foco de atracción económica y demográfica sin precedentes, pero también en un territorio vulnerable frente a la presión constructiva. Las áreas edificadas avanzaron sobre espacios de alto valor ecológico y cultural, comprometiendo los equilibrios pai-

sajísticos que habían caracterizado al estrecho durante siglos. La necesidad de compatibilizar crecimiento y conservación se transformó en un eje central de la planificación urbana desde comienzos del siglo XXI (Özyılmaz, Senlier y Yıldız, 2018).

Figura 2. Evolución histórico-temporal de la huella urbana de Estambul desde el siglo XV.



Fuente: elaboración de Verónica Casanovas a partir de Emden, 2009, y adaptada del preprint Casanovas et al. (2023).

El corredor marítimo del Bósforo, definido por una topografía de colinas y valles y por aldeas históricas encadenadas a lo largo de sus márgenes, ejemplifica con claridad esa tensión. La expansión, guiada por el atractivo escénico del entorno, fue ocupando progresivamente las laderas arboladas y las zonas costeras, alterando la morfología tradicional de los asentamientos ribereños. La proliferación de infraestructuras de transporte y la densificación residencial modificaron la escala visual del paisaje, transformando un escenario cultural equilibrado en un frente urbano de gran densidad (Özyılmaz, Senlier y Yıldız, 2018; Cürebal y Efe, 2011).

Figura 3. Área del Bósforo de Estambul.

Fuente: elaboración de Verónica Casanovas, a partir de información extraída del Plan Regional de Estambul (2014-2023) (Silahdaroglu et al., 2013), y adaptada del preprint Casanovas et al. (2023).

Paralelamente, diversos estudios pusieron de relieve los valores ambientales y paisajísticos de la región. La ciudad abarca 480.577 hectáreas, con una topografía predominantemente inclinada que combina colinas, valles y cuencas. En el ambi-

to marítimo, el canal actúa como eje divisorio entre las dos mitades del territorio, bordeadas respectivamente por el mar Negro al norte y el mar de Mármara al sur. La estructura verde de la metrópolis está compuesta principalmente por los bosques septentrionales, que ocupan unas 216.400 hectáreas, equivalentes al 40 % de la superficie total. Estos ecosistemas constituyen el principal reservorio ecológico de la región y desempeñan un papel esencial en la regulación climática y en la protección de los recursos hídricos (Başer, 2011). Su alcance ambiental, así como las políticas destinadas a su conservación, serán objeto de un análisis más detallado en el cuarto capítulo de este texto, dedicado a las estrategias de custodia del paisaje y del patrimonio.

En conjunto, la Estambul contemporánea refleja la coexistencia de dos fuerzas contrapuestas: la que impulsa la expansión y la que intenta preservar los valores ambientales y culturales. De esa tensión surge la imagen actual de la metrópolis: una ciudad que crece sobre sí misma, buscando en cada etapa un equilibrio entre desarrollo y memoria. ¿Hasta qué punto puede una metrópolis reinventarse sin desdibujar su identidad? ¿De qué manera la planificación contemporánea puede dialogar con las huellas de su pasado? ¿Es posible que una ciudad que se expande sobre su historia conserve el pulso vital de sus paisajes y su memoria? ¿Hasta dónde puede estirarse el territorio sin que se diluya la memoria que le dio forma?

III. DE BIZANCIO A LA MEGALÓPOLIS: HUELLAS DE UNA CIUDAD QUE CRECE SOBRE SU HISTORIA

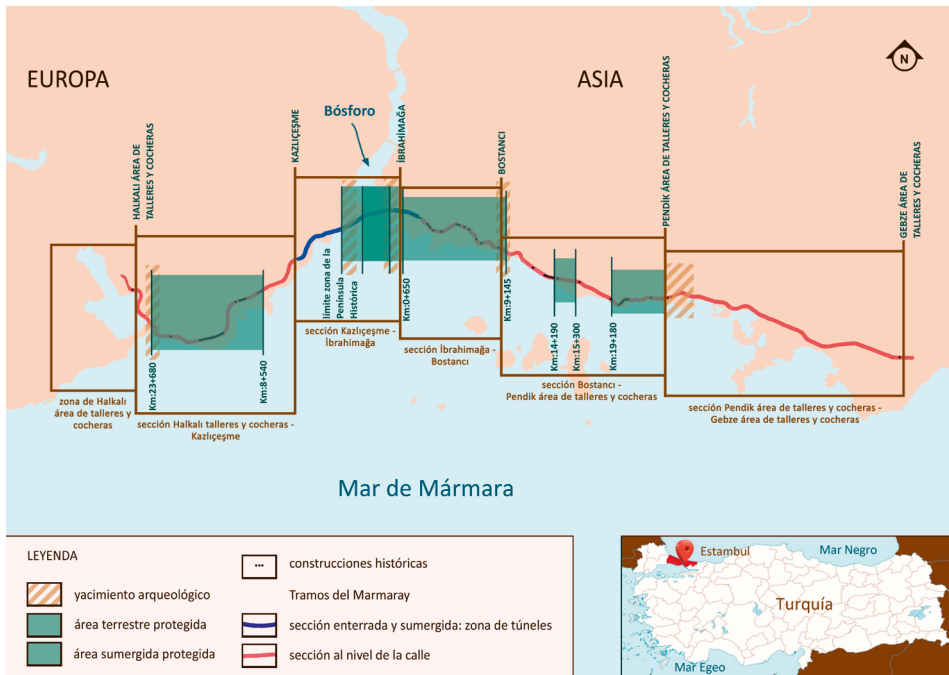
La historia de Estambul puede leerse como una secuencia de estratos superpuestos, una acumulación de huellas en la que cada época deja su marca sobre la anterior. Desde su fundación como Bizancio, hacia el 667 a. C., la ciudad se configuró como un territorio donde el poder, la fe y la memoria se materializaron en piedra. Su posición entre Europa y Asia, en la encrucijada del mar Negro y el mar de Mármara, determinó su destino como enclave de intercambio, pero también como espacio de sedimentación cultural. Con la refundación de Constantinopla en el año 330 d. C., la antigua colonia griega se transformó en capital imperial, y con ella emergió un nuevo orden urbano en el que la arquitectura se convirtió en instrumento de legitimación política y espiritual (Yenen, 2016).

Con el transcurso de los siglos, el paisaje urbano se amplió siguiendo la topografía de colinas y valles, y se densificó simbólicamente. Cada construcción añadía una capa de significado al territorio: los acueductos bizantinos, las murallas teodosianas, las basílicas convertidas en mezquitas, los palacios otomanos que incorporaban fragmentos del pasado. La ciudad se expandía en superficie y tam-

bién memoria. Su crecimiento fue, desde entonces, tanto físico como patrimonial: un proceso en el que la arquitectura funcionó como archivo y el espacio urbano como texto histórico en constante reescritura (Yenen, 2016).

Durante la Edad Media, la península histórica se consolidó como el corazón de este legado. Dentro de las murallas se concentraban el poder político y religioso, mientras en sus márgenes surgían barrios artesanales, mercados y monasterios que configuraban un tejido social y productivo diverso. Cada etapa dejaba un poso material: cimientos romanos bajo cúpulas bizantinas, muros otomanos sobre basamentos helenísticos. El territorio se convirtió así en un palimpsesto, una superficie en la que el tiempo se superpone y se acumula, haciendo coexistir las huellas de cada época en un mismo espacio (Yenen, 2016).

Figura 4. Trazado del sistema ferroviario del Marmaray en relación con las zonas patrimoniales y áreas de protección de Estambul.

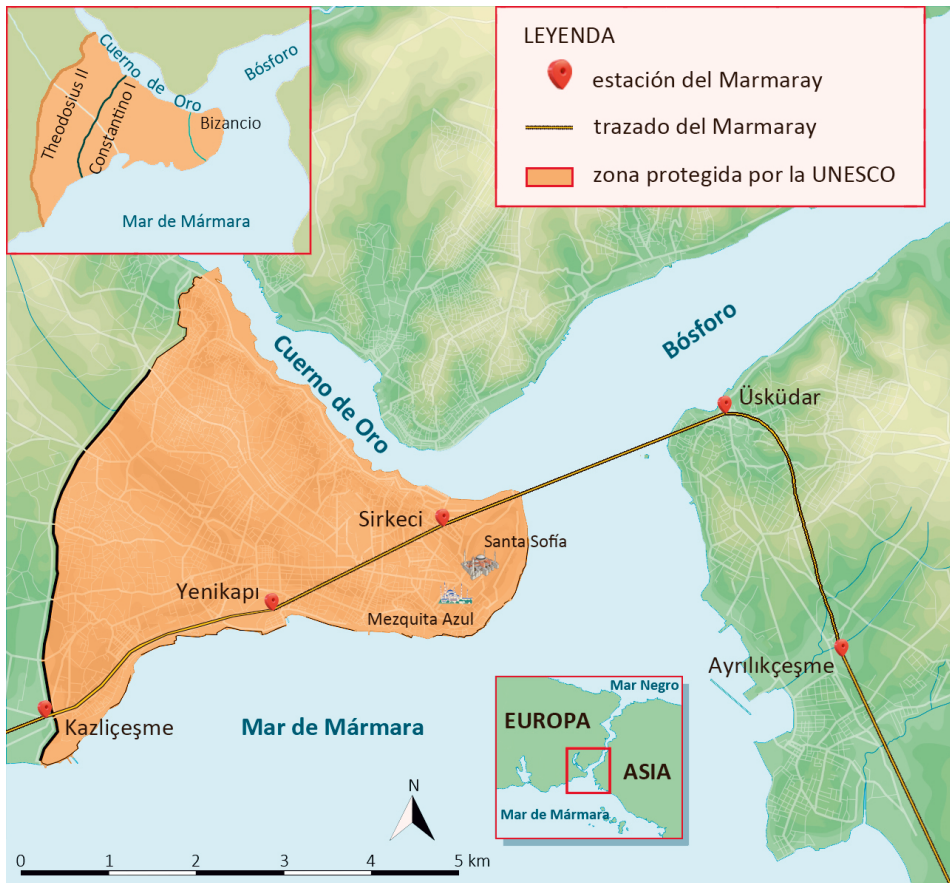


Fuente: elaboración de Verónica Casanovas, a partir de la información de los informes de MVG Mimarlık titulados *Etkileşim Raporu Envanter*, (Mehmet Ünal et al., 2004), y adaptada del preprint Casanovas et al. (2023).

El siglo XIX marcó un punto de inflexión en esta relación entre historia y ciudad. Las reformas del Tanzimat y la apertura hacia Europa introdujeron nuevos

lenguajes arquitectónicos y urbanísticos que transformaron la imagen tradicional de Constantinopla. Los planes de modernización, la construcción del ferrocarril y la creación de puertos y avenidas abrieron la ciudad al mundo (Christensen, 2017). Este contacto generó una nueva capa patrimonial: la del eclecticismo y la ingeniería moderna, que convivieron con los monumentos bizantinos y las estructuras otomanas, configurando un paisaje urbano de contrastes y continuidades.

Figura 5. Trazado del Marmaray a través del área Patrimonio de la Humanidad de UNESCO, en la Península Histórica de Estambul.



Fuente: elaboración de Verónica Casanovas, a partir de los estudios de Alexander van Millingen (1899), y adaptada del preprint Casanovas et al. (2023).

El siglo XX amplió aún más ese mosaico histórico. La industrialización y el crecimiento demográfico trajeron consigo la expansión hacia los suburbios, además de un cambio en la percepción del patrimonio. Las intervenciones en el casco

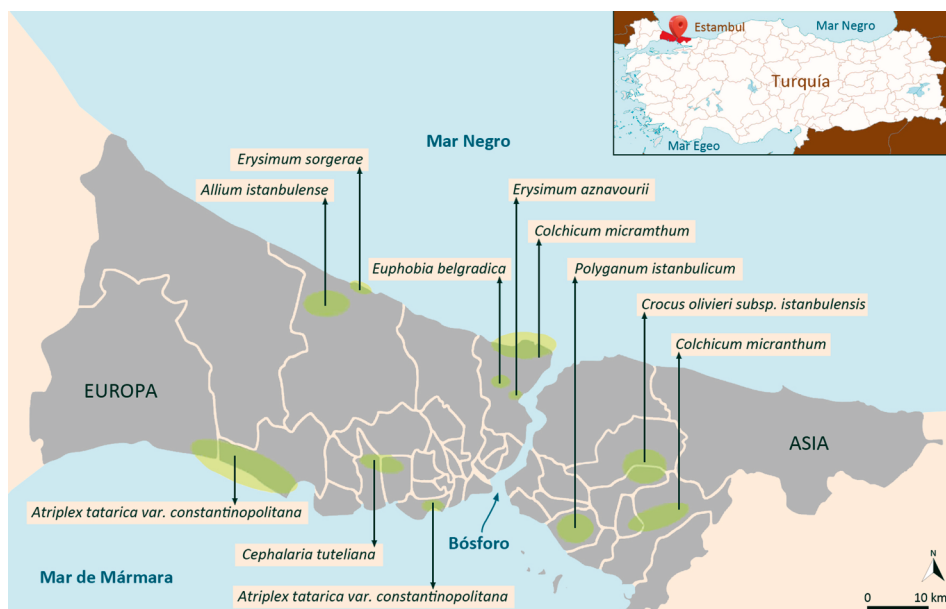
antiguo, la restauración de monumentos emblemáticos y la declaración del área histórica como Patrimonio Mundial por la UNESCO reforzaron la conciencia de una herencia común. Sin embargo, la presión de la modernización transformó el equilibrio entre conservación y desarrollo, integrando fragmentos del pasado en una metrópolis que crecía a un ritmo difícil de controlar (UNESCO, 2011).

En el siglo XXI, Estambul ha alcanzado la escala de una megalópolis global. En su estructura policéntrica conviven infraestructuras de transporte intercontinental con vestigios bizantinos, mezquitas otomanas y edificios republicanos. El trazado del Marmaray, que atraviesa las zonas protegidas de la península histórica, evidencia hasta qué punto el pasado y el presente coexisten en la misma geografía. En este contexto, el patrimonio cultural se convierte en una dimensión activa del territorio, entendido como una materia viva que participa en la transformación contemporánea (Emden, 2009).

El resultado es una ciudad que respira historia en cada uno de sus estratos. Las colinas dialogan con los minaretes, los valles con los acueductos, las aguas del Bósforo con la ingeniería contemporánea que las atraviesa. En ese tejido donde el tiempo se acumula y el pasado se transforma en presente, Estambul revela su verdadera naturaleza: una ciudad que crece sobre su historia y convierte su patrimonio en sustancia viva de su identidad. ¿Hasta dónde puede una ciudad reinventarse sin perder la continuidad de su memoria? ¿De qué modo la planificación puede proteger el espesor histórico del territorio mientras se adapta a los desafíos del futuro? ¿Puede el patrimonio cultural convertirse en la base de un nuevo modelo de desarrollo urbano? ¿Podrá una ciudad que ha aprendido a crecer sobre su historia aprender también a convivir con la naturaleza que le da forma?

IV. CUSTODIAR LO VIVO: ENTRE BOSQUES, COLINAS Y MARCOS DE PROTECCIÓN

El territorio de Estambul respira a través de sus bosques. En ellos late la memoria natural de una ciudad que creció entre el agua y las colinas, moldeando su identidad sobre un equilibrio siempre frágil entre lo urbano y lo silvestre. Esta trama vegetal, extendida hacia el norte, constituye el gran pulmón ecológico de la metrópolis. Sus masas arbóreas, que cubren cerca del cuarenta por ciento de la superficie municipal, regulan el clima, protegen los recursos hídricos y atenúan la contaminación atmosférica derivada del crecimiento metropolitano (Başer, 2011). Cada árbol guarda la huella de un territorio anterior a la expansión, un vestigio del paisaje que sostenía la ciudad antes de que esta se proyectara sobre sí misma.

Figura 6. Distribución territorial de las especies endémicas de Estambul.

Fuente: elaboración de Verónica Casanovas, a partir de *Natural and Cultural Traces of the Flora of Istanbul* (Akalin y Tuncay, 2018) y del *Istanbul Bölge Planı 2014–2023* (Akbayir et al., 2013).

Entre los claros del bosque, la diversidad vegetal se despliega como un archivo vivo de la historia natural de la región. Se han identificado cerca de 2.500 especies distribuidas en diferentes tipologías de espacios verdes: parques urbanos, jardines históricos, laderas arboladas y márgenes costeros. Diez de las sesenta especies autóctonas de la flora turca son endémicas exclusivamente de Estambul, lo que las convierte en testigos singulares de la adaptación y de la vulnerabilidad ante el crecimiento urbano (Akalin y Tuncay, 2018). En este mosaico de hábitats se entrelazan el pasado y el presente: las especies autóctonas que sobrevivieron a los siglos de transformación conviven con una vegetación introducida por el comercio, las migraciones y la historia cultural del Imperio. La flora de Estambul es, así, una crónica biológica de la ciudad, escrita en hojas, troncos y raíces.

El corredor marítimo del Bósforo refuerza esta riqueza ecológica. Al conectar el mar Negro con el de Mármara, su dinámica de corrientes, vientos y humedades genera una compleja red de microclimas que influyen directamente en la biodiversidad. Esta comunicación, conocida como Sistema de Estrechos Turcos (SET), convierte a la región en un corredor biogeográfico de gran valor, donde la salinidad, las mareas y la actividad humana se entrelazan en un equilibrio delicado (Bayram y Temel, 2011). El canal es, al mismo tiempo, frontera y arteria: una

línea de agua que separa continentes, pero que también los une mediante el flujo vital de sus ecosistemas.

A medida que la ciudad se expandía, surgió la conciencia de que este patrimonio natural debía preservarse. Desde la década de 1970, Turquía comenzó a incorporar instrumentos pioneros de conservación. La creación del organismo GEEAYK marcó un primer intento de proteger de forma integrada los valores naturales y culturales del área del Bósforo. Aquellos primeros planes, revisados entre 1977 y 1982, desembocaron en la Ley del Bósforo de 1983, que estableció un marco jurídico específico para un territorio de relevancia excepcional (Özyılmaz, Senlier y Yıldız, 2018). Estas medidas introdujeron una mirada más sensible hacia el entorno, aunque la expansión urbana continuó ejerciendo presión sobre los paisajes protegidos, obligando a revisar constantemente las estrategias de planificación.

La red de reservas naturales, parques y zonas verdes conforma hoy una auténtica arquitectura ambiental que atraviesa Estambul de sur a norte. Conectadas entre sí por corredores ecológicos, estas áreas funcionan como pulmones urbanos que moderan el clima, filtran el aire y acogen una biodiversidad cada vez más amenazada. No obstante, la fragmentación del territorio y la pérdida progresiva de vegetación autóctona debilitan la continuidad ecológica del conjunto. La conservación, entendida en el pasado como una serie de acciones aisladas, se concibe hoy como una integración activa de la naturaleza en la estructura urbana: una infraestructura viva que sostiene la vida cotidiana y la identidad del lugar (Başer, 2011).

El reconocimiento legal y técnico del patrimonio natural coincidió con la ampliación de las figuras de protección del patrimonio cultural. El área del Bósforo, por su singular combinación de paisaje natural y herencia construida, se consolidó como un espacio doblemente protegido: enclave ecológico y escenario histórico. Las políticas de conservación buscaron conciliar estos valores complementarios, pero la presión inmobiliaria y la atracción económica de la capitalidad cultural generaron tensiones persistentes entre desarrollo y preservación (Özyılmaz, Senlier y Yıldız, 2018).

Custodiar lo vivo implica comprender que el futuro de la ciudad depende de su capacidad para mantener un diálogo equilibrado con su entorno natural. En las colinas septentrionales, en los parques que descienden hasta el mar y en los jardines que acompañan a mezquitas y palacios se conserva la huella de un paisaje que ha resistido siglos de transformación. Esa continuidad ofrece una lección silenciosa: la prosperidad de Estambul está ligada a la salud de su territorio, a la preservación de sus ritmos y de su respiración verde. ¿Puede una metrópolis

conservar su diversidad biológica mientras continúa expandiéndose? ¿Hasta qué punto los marcos normativos bastan para proteger un paisaje sometido a presiones constantes? ¿De qué manera la planificación territorial puede integrar la naturaleza como parte estructural de su porvenir urbano?

Del mismo modo que el paisaje exige cuidado y equilibrio, las grandes infraestructuras que atraviesan su geografía deben concebirse como extensiones sensibles del territorio. La misma conciencia que guio la protección de los bosques y las colinas del Bósforo se trasladó a la ingeniería del Marmaray, donde cada decisión técnica buscó integrarse en la memoria del lugar y dialogar con la materia viva de la ciudad. ¿Podrá la técnica convertirse en una forma de cuidado, en lugar de una fuerza de transformación?

V. ANATOMÍA DE UN SISTEMA FERROVIARIO QUE UNE TIEMPOS Y CONTINENTES

El Marmaray es más que una infraestructura: es el resultado de un siglo de imaginación técnica y deseo político. Su trazado, que enlaza las orillas europea y asiática de Estambul, materializa un proyecto que nació en el siglo XIX como sueño imperial, y que sólo la tecnología del XXI pudo convertir en realidad. Desde las primeras ideas del sultán Abdülmecid I hasta su inauguración en 2013, el sistema sintetiza la ambición de una ciudad que aprendió a transformar sus límites geográficos en oportunidad de progreso (Christensen, 2017).

La innovación tecnológica se extiende por toda la traza, un recorrido de más de setenta y seis kilómetros que reconfiguró la red ferroviaria metropolitana. El proyecto integró las antiguas líneas suburbanas europeas y asiáticas en un único corredor intercontinental, sustituyendo por completo las vías preexistentes y construyendo tres nuevas: dos destinadas al servicio de cercanías y una tercera para trenes de alta velocidad e interurbano. Esta decisión permitió adaptar la infraestructura a estándares contemporáneos, optimizando la seguridad, la capacidad y la eficiencia del transporte (DLH, 2010; DLH, 2004).

La transformación alcanzó todo el sistema: se edificaron cuarenta y dos estaciones, modernizadas o completamente nuevas, dieciocho edificios técnicos y talleres, y ciento setenta y seis estructuras auxiliares entre viaductos, pasos elevados y túneles de conexión. Cada elemento fue diseñado para integrarse en la topografía compleja de la ciudad, un terreno de colinas, suelos aluviales y actividad sísmica constante. La ingeniería civil se convirtió así en un ejercicio de precisión

adaptativa, capaz de dialogar con un entorno urbano milenario sin alterar su carácter (DLH, 2010; DLH, 2004).

La primera autora de este artículo fue la responsable de la coordinación de las obras y el diseño de medidas destinadas a compatibilizar la ejecución técnica con la protección del patrimonio cultural y natural del tramo en superficie. En el transcurso del periodo 2011–2017, documentó el proceso de intervención, elaboró informes técnicos, gestionó la comunicación entre ingenieros, arquitectos, arqueólogos y planificadores, y supervisó estrategias de mitigación ambiental y patrimonial. Su experiencia permitió registrar de manera detallada la interacción entre infraestructura y territorio, entre tecnología y memoria.

Las excavaciones por la traza y construcciones ferroviarias aledañas revelaron capas ocultas de la ciudad: muros antiguos, cerámicas, embarcaciones bizantinas y vestigios portuarios. Lo que comenzó como una obra de ingeniería se convirtió en un viaje arqueológico, en el que cada avance técnico coincidía con un hallazgo histórico (Başgelen et al., 2013). Esta convivencia entre arqueología y construcción transformó el ritmo de las obras, imponiendo pausas que fueron también ejercicios de respeto hacia el pasado. Durante el recorrido, cincuenta y siete construcciones históricas interactuaron directamente con las intervenciones, generando un conjunto de experiencias únicas en el campo de la conservación. En ellas se ejecutaron todas las tipologías de actuación posibles en una construcción histórica, desde refuerzos estructurales, sistemas de aislamiento sísmico, hasta traslados definitivos, o temporales, o integraciones parciales en las nuevas infraestructuras, etc. Aunque este texto no profundiza en ese proceso, materia de un estudio independiente que se podría abordarse en otro artículo, su mención resulta necesaria para comprender la magnitud y la sensibilidad del trabajo desarrollado en el marco del Marmaray. La ingeniería y la historia aprendieron a avanzar juntas, compartiendo el mismo terreno y la misma memoria (Barış, Gazioğlu, Kaya y Şengül, 2021; UNESCO 2011).

El corazón técnico del proyecto se encuentra bajo el agua. La sección sumergida del Marmaray, de 1,4 kilómetros de longitud, conecta ambas orillas del Bósforo mediante un túnel de tubo sumergido (*immersed tube tunnel*) formado por once segmentos prefabricados. Cada uno, de unos 135 metros, fue ensamblado sobre el lecho marino con una precisión milimétrica. La profundidad máxima, de 60,46 metros bajo el nivel del mar, convierte al Marmaray en el túnel de este tipo más profundo del mundo (Acrefine Fixing & Seismic, 2022).

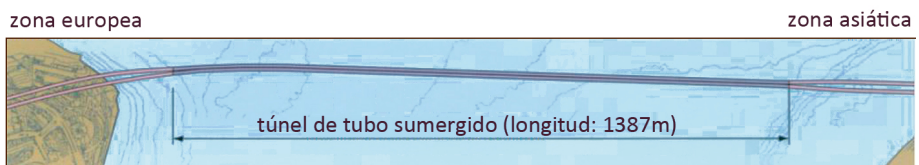
Los segmentos fueron construidos en el dique seco de Tuzla y remolcados por barcazas hasta su ubicación definitiva. La instalación se realizó mediante un sistema de lastres y aire comprimido que permitió hundirlos de forma controlada,

garantizando su alineación exacta. La unión de los extremos se selló con juntas flexibles diseñadas para absorber movimientos sísmicos de hasta nueve grados en la escala de Richter (Ingerslev, Iversen y Özgür, 2020). La decisión de apoyar el túnel sobre el lecho marino, y no excavarlo, respondió al propósito de preservar la estabilidad de los sedimentos y de las corrientes del estrecho (Yüksel Proje, s.f.).

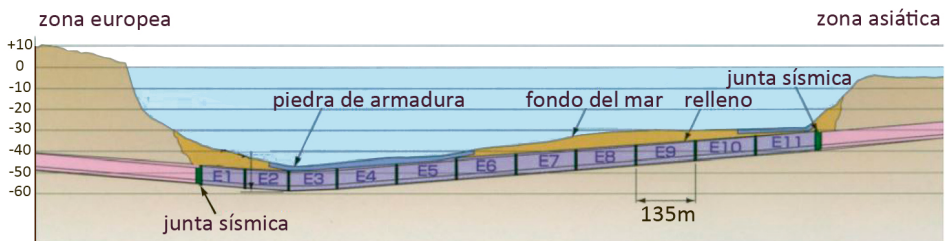
Figura 7. Esquemas explicativos del túnel de tubo sumergido del Marmaray en el Bósforo.



1. Plano del Marmaray: tramos en superficie y enterrados



2. Planta del túnel de tubo sumergido



3. Sección longitudinal del túnel de tubo sumergido

Fuente: elaboración de Verónica Casanovas, a partir de Yavuz, 2011, y adaptada del preprint Casanovas et al. (2023).

En los tramos terrestres, la excavación se llevó a cabo mediante tuneladoras de presión balanceada (*Tunnel Boring Machine*, TBM), capaces de controlar los

empujes del terreno y minimizar las vibraciones en zonas urbanas densamente edificadas. Este sistema, complementado con sensores geotécnicos de alta precisión, permitió garantizar la seguridad estructural de los edificios colindantes y reducir el impacto superficial de las obras (Sakaeda, 2005).

La combinación de métodos, prefabricación sumergida, perforación mecanizada y control sísmico integral, convirtió al Marmaray en una referencia mundial de ingeniería subterránea. Su construcción demostró que la técnica puede integrarse en el paisaje sin destruirlo, y que la innovación, cuando se concibe desde el respeto, puede convertirse en un acto de diálogo con la historia (Ingerslev, Iversen y Özgür, 2020; Cürebal y Efe, 2011).

Bajo el Bósforo, la línea férrea atraviesa roca y agua, y al mismo tiempo la memoria de una ciudad que ha aprendido a convivir con sus estratos. El acero y el hormigón conviven con los vestigios bizantinos y otomanos, y juntos escriben una nueva capa en el palimpsesto de Estambul. En el silencio del túnel, bajo la presión del agua y el peso de los siglos, late la respiración profunda de una ciudad que sigue uniendo su pasado con su futuro. ¿Hasta qué punto la técnica puede reconciliarse con la historia? ¿Puede una obra de ingeniería convertirse en un acto de continuidad cultural? ¿De qué manera el conocimiento adquirido en obras de esta escala puede inspirar modelos de intervención más respetuosos con el territorio? ¿Podrá la ingeniería que unió continentes convertirse también en el latido sostenible de la metrópolis que los habita?

VI. EL PULSO LIMPIO DE LA CIUDAD: HACIA UNA MOVILIDAD SOSTENIBLE

La infraestructura ferroviaria que une las dos orillas de Estambul transformó el ritmo de la ciudad. Su trazado subterráneo, concebido para aliviar la congestión del tráfico rodado, introdujo una nueva respiración en el paisaje urbano. En un territorio donde los puentes y las avenidas habían alcanzado su límite, el sistema ferroviario intercontinental ofreció una vía de conexión más silenciosa y estable, capaz de reconciliar el movimiento cotidiano con la calidad del aire (Cürebal y Efe, 2011).

La transformación fue inmediata. Las previsiones indicaban que la proporción de desplazamientos en tren pasaría del 3 % al 27,7 % del total de viajes diarios, una variación de enorme alcance para la movilidad urbana (DLH, 2010). Millones de trayectos que antes dependían del automóvil encontraron un cauce eléctrico y continuo bajo el suelo de la metrópolis. Las frecuencias de paso, reducidas

a dos minutos en las horas de mayor demanda, marcaron un nuevo ritmo para la vida diaria, redefiniendo la relación entre tiempo, distancia y paisaje.

A medida que los trenes comenzaron a recorrer la ciudad, el entorno cambió de respiración. El tráfico superficial descendió, los cruces se descongestionaron y el aire se volvió un poco más limpio (Cürebal y Efe, 2011). Las áreas antes ocupadas por carreteras y aparcamientos se transformaron paulatinamente en espacios peatonales, parques y corredores verdes. En ese proceso silencioso emergió un nuevo orden urbano: la movilidad dejó de ser un problema de tránsito para convertirse en una estrategia de equilibrio ambiental.

El impacto ecológico del proyecto se tradujo en resultados tangibles: una reducción anual estimada de 6.400 toneladas de gases de efecto invernadero, junto con la disminución de accidentes de tráfico y del consumo energético vinculado al transporte privado (Ingerslev, Iversen y Özgür, 2020). Los efectos positivos alcanzaron también al ámbito marítimo: al reducir la presión sobre los puentes del Bósforo, el tránsito de embarcaciones disminuyó y las aguas del canal comenzaron a recuperar transparencia (Bayram y Temel, 2011).

La interconexión con otras redes de transporte urbano completó el modelo. Las estaciones se transformaron en nodos intermodales que enlazan trenes, tranvías, autobuses y metros (DLH, 2004). En torno a ellas surgieron nuevas centralidades, impulsando la regeneración de áreas periféricas y fomentando una economía más equitativa. El transporte público dejó de ser una alternativa marginal para convertirse en la columna vertebral de la vida metropolitana.

El sistema ferroviario constituye también una lección de ingeniería aplicada a la sostenibilidad. Su trazado combina tramos subterráneos, secciones a cielo abierto y un túnel sumergido bajo el canal, integrando soluciones constructivas capaces de resistir presiones marinas y movimientos sísmicos (Yavuz, 2011). La precisión en la prefabricación, el control geotécnico y la eficiencia energética de las operaciones expresan un mismo principio: la técnica puesta al servicio del equilibrio urbano. El túnel de tubo sumergido, ensamblado con una exactitud casi quirúrgica, se convierte en metáfora de una ciudad que aprende a moverse sin alterar su estabilidad.

El impacto del Marmaray trasciende el ámbito del transporte. Desde los vagones, el viajero contempla una urbe que se redibuja a su paso: colinas que se suceden, riberas que se abren, barrios antiguos que se entrelazan con nuevas estaciones. El viaje entre continentes, antes un desplazamiento excepcional, se ha convertido en un gesto cotidiano, en una experiencia que une la modernidad con la memoria (Emden, 2009).

Concebido como una hazaña técnica que unió continentes bajo el agua, es hoy la espina dorsal de una movilidad más limpia y racional. La infraestructura que nació del deseo de conectar orillas y superar fronteras físicas se proyecta ahora como modelo de sostenibilidad metropolitana. Bajo su trazado late la idea de una ciudad que aprende a desplazarse con menor impacto, integrando la eficiencia tecnológica con el respeto por el entorno y la memoria. La ingeniería que unió tiempos y geografías se transforma así en una red viva al servicio de un porvenir más habitable.

En esta transformación, la movilidad adquiere un sentido vital. Cada tren que avanza bajo el mar o entre los barrios periféricos prolonga el latido de una ciudad que busca respirar mejor. El pulso limpio que da título a este capítulo no es solo una metáfora poética: es la medida tangible de una urbe que intenta sincronizar tecnología y sostenibilidad, progreso y bienestar. ¿Puede el transporte público convertirse en una forma de equilibrio ecológico? ¿Hasta qué punto la tecnología aplicada al desplazamiento puede reconciliar a la ciudad con su propio aire? ¿Será posible que la planificación futura conserve este ritmo de respiración limpia en medio de un crecimiento que nunca se detiene? ¿Podrá Estambul, ciudad de agua y de historia, aprender de su propio movimiento para construir un futuro más consciente, habitable y resiliente frente a la expansión de la globalización?

VII. UNA CIUDAD QUE APRENDE: BALANCE CRÍTICO Y HORIZONTE DE FUTURO

El recorrido de esta investigación revela a Estambul como un organismo en perpetua transformación, una ciudad que se reinventa sobre las huellas de su historia. En su geografía confluyen los ritmos del agua, las huellas del tiempo y la pulsación del crecimiento contemporáneo. Cada edificio, cada puente, cada túnel y cada vía férrea forman parte de una narrativa mayor: la de una megalópolis que busca equilibrio entre expansión y memoria, entre innovación y permanencia.

Las infraestructuras analizadas demuestran que la modernidad puede adquirir una dimensión patrimonial cuando se construye desde la conciencia del lugar. La sección del sistema ferroviario bajo el Bósforo constituye algo más que una conexión técnica: representa un gesto simbólico, una reconciliación entre los estratos del tiempo. En esa conjunción de tecnología y paisaje, de progreso y herencia, se reconoce la capacidad de la ciudad para aprender de sí misma y transformar su experiencia en conocimiento colectivo.

Estambul se configura, así como un laboratorio donde pasado y futuro conviven, se rozan y dialogan. Las políticas de planificación, las estrategias de movilidad y las medidas de protección ambiental dejan de ser compartimentos estancos, para entenderse como componentes de un mismo tejido vital. Integrar estas dimensiones equivale a diseñar un modelo de desarrollo atento al territorio, capaz de reconocer la fragilidad que lo sustenta y de actuar con prudencia sobre ella.

La experiencia demuestra que el crecimiento no es un fin en sí mismo. La vitalidad de una metrópolis depende de su habilidad para escuchar los límites del espacio que habita y adaptarse a ellos con inteligencia. Las colinas, los bosques y el mar conforman una estructura viva que, más allá de su belleza, sostiene la calidad de vida de sus habitantes. Custodiar ese equilibrio equivale a preservar la identidad profunda de la ciudad.

Desde esta perspectiva, la planificación urbana deja de ser un ejercicio de expansión para convertirse en un proceso de escucha. Aprender del territorio implica reconocer sus ritmos, sus vacíos y sus resistencias. La ingeniería, el urbanismo y la gestión patrimonial pueden converger en un lenguaje común cuando la prioridad es la continuidad de la vida, del paisaje y de la memoria.

Cada infraestructura deja tras de sí una lección. El túnel que une continentes, los trenes que atraviesan la metrópolis, las leyes que protegen sus colinas y las decisiones que regulan su crecimiento son capítulos de un mismo aprendizaje. La ciudad se construye, se interrumpe y se reconstruye, pero en ese ciclo acumula conocimiento y desarrolla una sensibilidad hacia el espacio que la contiene.

Estambul enseña que la sostenibilidad es también una forma de memoria. En la medida en que el desarrollo reconoce sus raíces, la urbe se convierte en un territorio que aprende. Las transformaciones urbanas dejan entonces de ser actos de ruptura para convertirse en gestos de continuidad: extensiones de un paisaje que respira desde hace milenios entre dos continentes. ¿Puede una metrópolis aprender de sus propios errores y transformarlos en estrategias de futuro? ¿Hasta qué punto la planificación puede convertirse en una forma de sabiduría urbana? ¿Seremos capaces de construir ciudades que crezcan al ritmo de la naturaleza y de la historia que las sostiene?

Solo el tiempo podrá responder a estas preguntas. Tal como señala la UNESCO (2011), *“el paisaje urbano histórico es la huella material de las civilizaciones pasadas, pero también el marco donde se desarrolla el porvenir de la humanidad”*. Quizá el destino de Estambul, y de todas las ciudades que aspiran a aprender de sí mismas, resida en ese equilibrio: construir el futuro sin olvidar que cada

piedra, cada bosque y cada corriente de agua forman parte de la memoria viva del mundo.

REFERENCIAS

- Acrefine Fixing & Seismic. (2022). *Marmaray Tunnel, Istanbul*. <https://acrefine.com/news/marmaray-tunnel-istanbul/>
- Akalin, E. y Tuncay, H. O. (2018). Endemism in Istanbul Plants, *Istanbul University Press*, Estambul, 77(1), pp.:39-41.
- Akbayir, İ. C.; Ak-Tutanç, B.; Altay, O.; Alpagut, Z.; Celep, B.; Korkmaz, S.; Öncül, E.; Pişkin, F.; Silahdaroğlu, A.; Sipahioğlu, H.; Şişkolar, Z. y Türkseven, N. (2013). *2014-2023 İstanbul Bölge Planı*, Istanbul Kalkinma Ajansı (IKA).
- Başer, B. (2011). Natural and Cultural Traces of the Flora of Istanbul, *Turkish Academy of Sciences Journal of Cultural Inventory*, 9, pp.:155-166.
- Başgelen et al. (2013). İstanbul'da marmaray-Metro Projeleri Kurtarma Kazıları (2004-2011) ve Kent Arkeolojisine Katkıları. *Journal of Archaeology and Art*, Istanbul, 113-124.
- Barış, Ş.; Gazioğlu, C.; Kaya, H. y Şengül, A. (2021). Archaeological Traces of Küçükçekmece (Bathonea) Excavations, *International Journal of environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 8(3), pp.:386-396.
- Bayram, Ö. y Temel, O. (2011). Mechanisms Impeding Natural Mediterraneanization Process of Black Sea Fauna, *Black Sea-Mediterranean Environment*, 17(3), pp.:234-253.
- Casanovas, V.; Soria, C. H. y López, G. A. (2023). The Marmaray Railway Infrastructure: The Challenges of the Heritage Protection before the Growth of Istanbul's Urban Areas. <https://doi.org/10.20944/preprints202306.1527.v1>
- Christensen, P. H. (2017). *Germany and the Ottoman Railways: Art, Empire, and Infrastructure*, Londres, Yale University Press, New Haven and London.
- DLH (2010). *ERQ. Employer's requirement. Contract CR3: Gebze – Halkali Commuter Rail Upgrading: Civil & Electrical & Mechanical Systems*, Ankara.
- DLH (2004). *ERQ. Employer's requirement. Contract BC1: Railway Bosphorus tube crossing, tunnels and stations*, Ankara.
- Cürebil, İ. y Efe, R. (2011). Impacts of the Marmaray Project (Bosphorus Tube Crossing, Tunnels and Stations) on Transportation and Urban Environment in Istanbul, *Engineering Earth-The Impacts of Megaengineering Projects*, Stanley D. Brunn Editions, 41, pp.:715-733.
- Emden, C. (2009). Urban Footprint. En: "Istanbul City of Intersections", *Urban Age*, The London School of Economics and Political Science, 2009, pp.:19-34.
- Ingerslev, L. C., Iversen, C. y Özgür, O. (2020). *Marmaray (Bosphorus Crossing), Tunnelling and Underground Space Technology*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104288>
- Karpat, K. H. (2004). The Genesis of the Gecekondu: Rural Migration and Urbanization (1976), *European Journal of Turkish Studies*, 1. <https://doi.org/10.4000/ejts.54>
- Özyılmaz, P.; Senlier, N. y Yıldız, R. (2018). Planning Process of the Istanbul Bosphorus Area, Conflicts and Challenges, *Fifth International Symposium Monitoring of Mediterranean Coastal Areas: Problems and Measurements Techniques*, Conferencia en Livorno (Italia).

- Sakaeda, H. (2005). Marmaray project: Tunnels and stations in BC contract, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), pp.:612-616.
- UNESCO (2011). *Recommendation On The Historic Urban Landscape*, 10 de noviembre de 2011, París, <https://whc.unesco.org/en/hul/>
- Yavuz, E. (2011). Istanbul (Bosphorus) Immersed Tube Tunnel and Survey Works, *International Journal of the Physical Sciences*, 6(9), pp.:2303-2307.
- Yenen, Z. (2016). Paisaje Cultural Histórico de Estambul, Número especial, Patrimonio Mundial en Turquía. *Revista Patrimonio Mundial*, Convención del Patrimonio Mundial UNESCO, 80, pp.:23-39.
- Yüksel Proje. (s.f.). *Marmaray Project*. <https://www.yukselproje.com.tr/en/about-us/en/projects/marmaray-en>

