



Pautas técnicas para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo contemplando las características del sistema hidrogeológico local. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina

Technical guidelines for the design of works with underground use considering the characteristics of the local hydrogeological system. The case of the city of Santa Fe, province of Santa Fe, Argentina

Lanzaro, María Verónica 

Recibido: 24 de marzo de 2022 • Aceptado: 13 de julio de 2022

Resumen

El entramado edilicio y de infraestructura alojado en el subsuelo urbano se encuentra sometido a condicionantes de servicio que deben ser considerados en el proyecto de toda obra subterránea para su correcta ejecución, seguridad y funcionalidad. La falta de estanqueidad puede reducir severamente la durabilidad a largo plazo de las obras y afectar gravemente su uso planificado resultando en procesos peligrosos, costosos, difíciles de resolver o irreversibles.

A partir de un relevamiento de campo se detectaron en la ciudad de Santa Fe numerosas construcciones subterráneas con patologías edilicias relacionadas con ingreso de agua subterránea estacional, obras probablemente ejecutadas en periodos de niveles freáticos más bajos a los que luego han debido soportar, desconociendo el comportamiento del sistema hídrico subterráneo y la acción que el agua subterránea pudiera ejercer sobre la estructura; presentando además inadecuadas protecciones impermeables o incluso sin ellas.

Este trabajo tiene por objeto la definición de pautas técnicas a fin de contribuir a la protección y seguridad de obras subterráneas. Para ello se realizó una indagación exhaustiva de técnicas y sistemas de impermeabilización para obras subterráneas.

En cuanto a los requerimientos de proyecto y métodos o sistemas de impermeabilización para obras subterráneas se estudiaron las recomendaciones de una norma de la British Standards Institution denominada “Código práctico para la protección de estructuras subterráneas frente a la acción del

Dirección Provincial de Arquitectura e Ingeniería. Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat (M.I.S.P. y H.), Provincia de Santa Fe, Francisco Miguenz 180, Piso 3, Corporate Tower, Dique 1, Puerto de Santa Fe. (3000) Santa Fe, Argentina.

✉ mlanzaro@santafe.gov.ar

agua subterránea” (BS 8102: 2009). Y en cuanto a la seguridad estructural, para la determinación de la resistencia mecánica y estabilidad de estructuras, se analizó el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201, 2005 que integra el conjunto de reglamentos de seguridad estructural de construcciones civiles en el país.

El relevamiento de campo realizado en el área de estudio, se focalizó sobre diversas obras existentes con aprovechamiento subterráneo, incluyendo infraestructura edilicia y vial, infraestructura de redes subterráneas de servicios, y se recopiló desde el año 2015, registros publicados en medios locales relacionados con casos de problemas geotécnicos/estructurales, hundimientos, socavones, y colapso de redes de la infraestructura de servicios en la ciudad.

El estudio y la integración de estos aspectos permitió el desarrollo de una guía técnica para que todo proyecto de obra subterránea sea resultado de una evaluación del entorno medioambiental; del medio hidrogeológico; de un diseño estructural apropiado e incluyendo sistemas de impermeabilización adecuados a la obra en análisis. El procedimiento de evaluación desarrollado se complementó con la generación de un catálogo de materiales disponibles en el país para impermeabilización subterránea clasificados conforme a la guía propuesta.

Estos resultados contribuirán a gestionar los condicionamientos o riesgos inherentes a las obras subterráneas, asumiendo la relación compleja existente entre el uso del suelo urbano y el medio hidrogeológico local.

Palabras clave: aguas subterráneas, áreas urbanas, obras subterráneas, protecciones impermeables.

Abstract

The building and infrastructure framework housed in the urban subsoil is subject to service conditions which must be considered in the project of all underground work for its correct execution, safety and functionality. The lack of tightness can severely reduce the long-term durability of the works and seriously affect their planned use resulting in dangerous, expensive, difficult to solve or irreversible processes.

From a field survey, numerous underground constructions with building pathologies related to seasonal groundwater entry were detected in the city of Santa Fe, works probably carried out in periods of lower groundwater levels than those that later had to withstand, ignoring the behavior of the underground water system and the action that the underground water could exert on the structure; also presenting inadequate waterproof protections or even without them.

The purpose of this work is to define technical guidelines in order to contribute to the protection and safety of underground works. To this end, an exhaustive investigation of waterproofing techniques and systems for underground works.

Regarding the project requirements and methods or waterproofing systems for underground works, the recommendations of a standard of the British Standards Institution called “Code of practice for protection of below ground structures against the action of groundwater” (BS 8102: 2009). And in terms of structural safety, for the determination of the mechanical resistance and stability of structures, the Argentine Regulation of Concrete Structures CIRSOC 201, 2005 was analyzed, which integrates the set of structural safety regulations of civil constructions in the country.

The field survey carried out in the study area focused on various existing works with underground use, including building infrastructure, roads and underground service networks, and since 2015, records published in local media related to cases of geotechnical/structural problems, subsidence, sinkholes, and collapse of service infrastructure networks in the city.

The study and integration of these aspects made it possible to develop a technical guide so that every underground work project is the result of an environmental assessment; the hydrogeological environment; of an appropriate structural design and including adequate waterproofing systems for the work under analysis. The developed evaluation procedure was complemented with the generation of a catalog of materials available in the country for underground waterproofing classified according to the proposed guide.

These results will contribute to managing the conditions or risks inherent to underground works, assuming the complex relationship between the use of urban land and the local hydrogeological environment.

Keywords: groundwater, urban areas, underground constructions, waterproof protections.

INTRODUCCIÓN

El entramado edilicio y de infraestructura subterránea alojado en el subsuelo de las áreas urbanas se encuentra sometido a diversos condicionantes de servicio o de estrés por la exposición al entorno medioambiental en cuanto a la agresividad química, física y biológica; al entorno hidrogeológico; y en relación con

un diseño estructural apropiado a las particularidades del tipo de obra y a la acción que el agua subterránea pudiera ejercer sobre la misma (Chilton, 1997; Dávila Pórcel & de León Gómez, 2011; Gebremedhin, Tesfahunegn & Solomon, 2013; Lerner, 1990 y 1997; Vázquez-Suñé et al., 2005; Vázquez Suñé, Sánchez-Vila, Carrera & Marizza, 1997; entre otros).

Por otra parte, las obras subterráneas requieren parámetros elevados de calidad e ingeniería y poseen una complejidad técnico-constructiva relacionada no solo con su propia materialidad sino con las excavaciones y su cimentación profunda. En todos los casos, si se ejecuta una excavación cerca o por debajo del nivel freático existe riesgo de inundación, filtración de agua e inestabilidad para la obra y el entorno (Foster et al., 1998). La interacción del agua subterránea y la obra es importante no solo durante la ejecución sino también a lo largo de toda su vida útil (Custodio, 2004; Shanahan, 2009). Además de la seguridad estructural, se requieren protecciones adicionales, ya que la falta de estanqueidad afecta severamente la durabilidad a largo plazo y el uso planificado de las obras.

Estudios previos realizados en la ciudad de Santa Fe (Lanzaro & D'Elia, 2021) permitieron establecer relaciones entre el sistema acuífero que subyace a la ciudad y las construcciones subterráneas existentes, como fundaciones, recintos subterráneos y redes de la infraestructura de servicios.

El objetivo de este trabajo es definir pautas técnicas para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo a fin de contribuir a la protección y seguridad de las obras subterráneas desde el inicio de un proyecto.

ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, capital de la Provincia de Santa Fe, se ubica en el centro-este de la República Argentina, en la región geográfica denominada llanura pampeana.

El área urbana de la ciudad, que constituye el área de estudio abarca 80,4km² (Figura 1). La ciudad está emplazada entre los valles de inundación de los ríos Paraná y Salado, con crecidas máximas históricas del río Paraná en los años 1977, 1983, 1987 y del río Salado en 1973, 2003.

La expansión urbana fue ocupando terrenos inundables de los valles de inundación, lo que llevó a generar un sistema de protección contra inundaciones que implicó el relleno de zonas bajas y modificó significativamente el drenaje natural, transformando a la ciudad en un territorio vulnerable, expuesto a riesgos hídricos por las crecidas de los ríos, lluvias intensas o ambos fenómenos. Según estudios previos, el clima de la ciudad es templado y húmedo, la temperatura media anual es del orden de 19°C y la precipitación media anual es de 1007mm (período 1901-2007). Se evidencia un aumento de la precipitación a partir de la década del '70, con precipitaciones anuales del orden de 900 a 1200mm, con persistencia de condiciones húmedas, eventos lluviosos muy intensos y arealmente concentrados (Pagliano, 2008).

La geología e hidrogeología del área de estudio se conoce de estudios regionales y locales, estos últimos a cargo del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral que ha implementado una red de monitoreo del agua subterránea (Figura 1). "La base de la secuencia sedimentaria de interés hidrogeológico posee arenas grises y arcillas verdes de la Formación Paraná. Superiormente, existen arenas y arenas gravosas de 30m

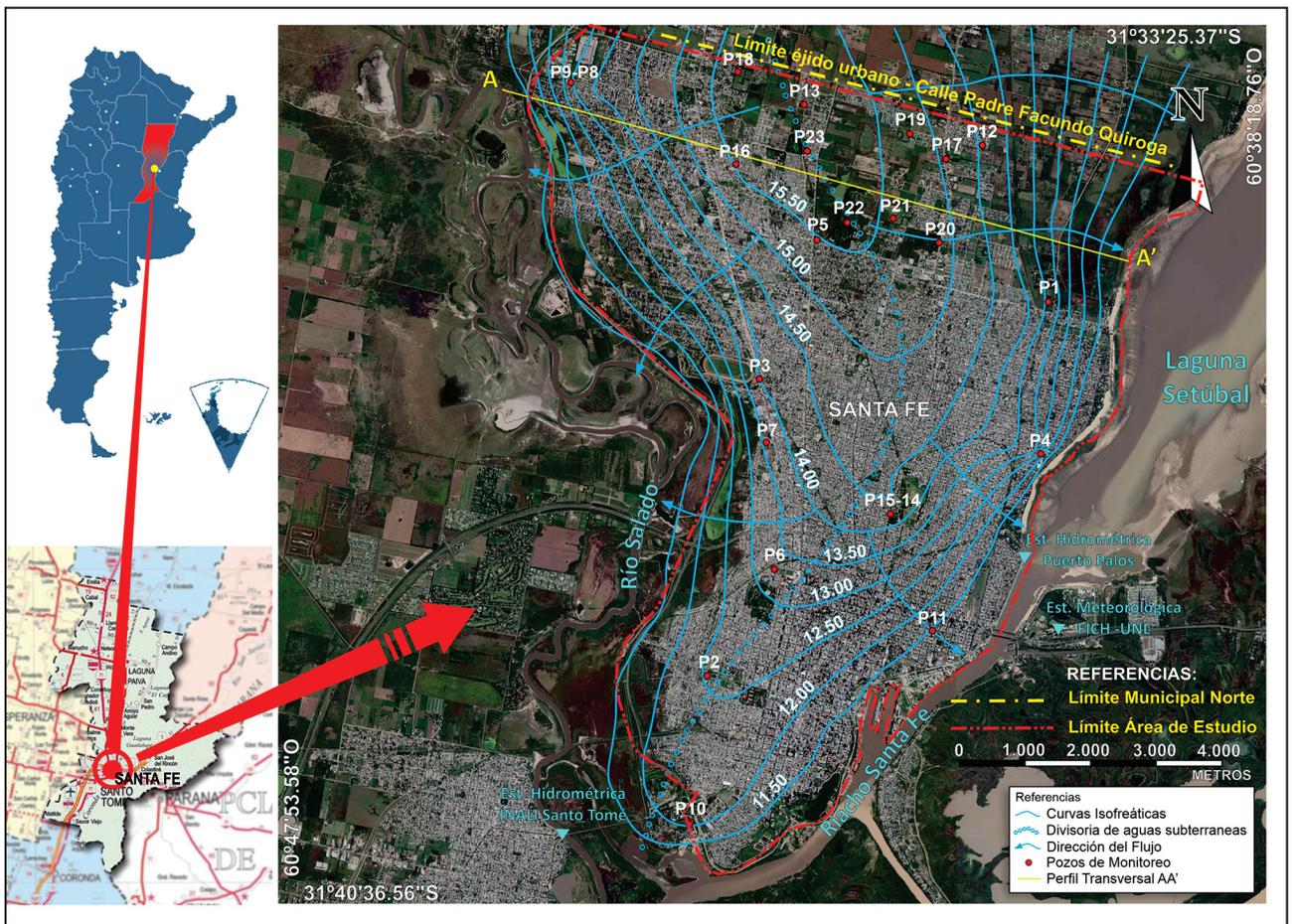


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de espesor promedio de la Formación Ituzaingó (conocida como Arenas "Puelches"). Sobre estas y hasta la superficie, se apoyan sedimentos cuaternarios de menor granulometría (arenas finas a limos, con arcillas) de origen eólico, de 6m de espesor promedio. Esta secuencia sedimentaria da lugar a un acuífero multicapa comportándose como libre con drenaje diferido" (Figura 2). La recarga del acuífero es principalmente por precipitaciones. La descarga se da hacia el río Salado y la laguna Setúbal. (D'Elia et al., 2011).

A partir de estudios locales realizados sobre áreas urbanas de alta consolidación se ha constatado que la profundidad del nivel freático varió entre 1,70m y aproximadamente 8m desde el nivel del terreno durante el período 08/2008-08/2018.

Se observaron fundaciones de edificaciones y redes de cañerías de distinta jerarquía y a distintas profundidades, en gran parte alojadas en estratos de suelo en contacto permanente con el agua subterránea (suelo saturado). Además, se comprobó la presencia de recintos subterráneos como las cocheras de edificios en altura en contacto con agua subterránea en períodos de niveles freáticos altos, sometidos a una acción de subpresión que ejerce el agua bajo la platea de fundación y a posibles empujes laterales si los niveles freáticos superaran el fondo del recinto, humedad ascendente por capilaridad, riesgos de infiltración de agua en el interior, etc. A su vez, en período de niveles freáticos altos, cañerías como las de la red pluvial podrían correr riesgo de flotación, especialmente en momentos donde no transportan fluidos (Lanzaro & D'Elia, 2021) (Figura 3).

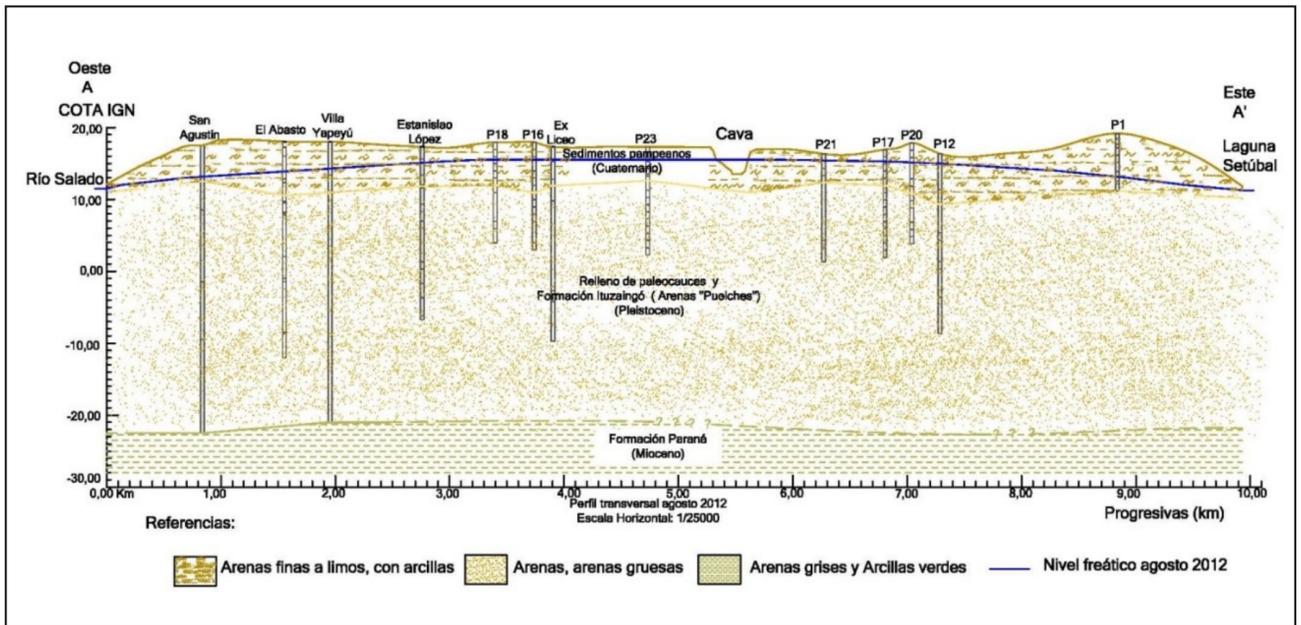


Figura 2. Perfil Estratigráfico A-A'. Fuente: D'Elia et al., 2011.

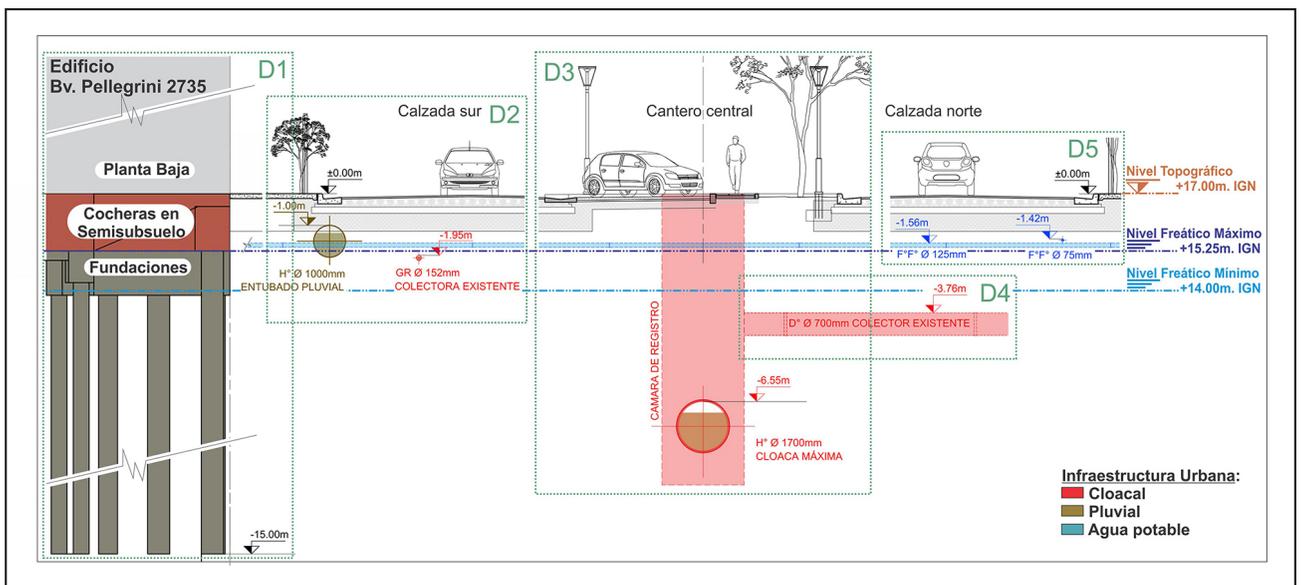


Figura 3. Subsuelo urbano y fluctuaciones de niveles freáticos. Fuente: Lanzaro & D'Elia, 2021.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de investigación se tuvieron en cuenta el marco normativo de aplicación en cuanto a lo técnico, legal, institucional, ambiental, de planificación urbana e ingeniería estructural para construcciones subterráneas; los aspectos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidrogeológicos incluyendo datos de mediciones de profundidades de nivel de agua subterránea, registros históricos de precipitaciones, de altura de ríos, eventos meteorológicos extraordinarios, parámetros químicos de muestras de agua subterránea, etc., a fin de conocer ciertos patrones de comportamiento y características del acuífero en el área de estudio.

Se realizó un relevamiento de campo en el área de estudio, de diversas obras existentes con aprovechamiento subterráneo, incluyendo infraestructura edilicia y vial, infraestructura de redes subterráneas de servicios, y se recopilaron desde el año 2015, registros publicados en medios locales relacionados con casos de problemas geotécnicos/estructurales, hundimientos, socavones, y colapso de redes de la infraestructura de servicios (Lanzaro, 2020).

Se contó con información de las trazas principales y secundarias de la red de la infraestructura de servicios de agua potable y cloacas; información de cuencas y subcuencas de aporte del Plan Director de Desagües Pluviales y de trazas principales de la red de drenaje pluvial de la ciudad con su posición georreferenciada, diámetros, secciones y profundidades, y el conjunto de obras de drenajes pluviales existentes, proyectadas y en ejecución.

Este conjunto de datos disponibles fue sistematizado en una planilla de cálculo Excel (Microsoft; 2016). Los niveles de agua superficial y subterránea se referenciaron al “cero” del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se realizaron gráficos de la evolución de los niveles freáticos en el tiempo y su relación con los cuerpos de agua superficiales y con las precipitaciones locales; y se determinaron las fechas que se correspondían con períodos de niveles de agua subterránea máximos y mínimos. Contando con los datos del monitoreo de niveles del agua subterránea en los 23 pozos de monitoreo relevados por el GIG-FICH-UNL en la ciudad, se realizó un análisis espacial de los niveles freáticos para las fechas de niveles extremos a través de la elaboración de mapas de curvas isofreáticas utilizando el software Surfer 13 (Golden Software LLC; 2016). Estos mapas de curvas isofreáticas máximas y mínimas obtenidos, se integraron con las curvas de niveles topográficos de la ciudad, todas referidas al cero de IGN.

Mediante la utilización del software ArcGIS Desktop 10.5 (Esri Inc.; 2016) se posicionaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) los resultados del relevamiento de construcciones con aprovechamiento subterráneo en la ciudad y los registros de casos de hundimientos, colapso de redes de la infraestructura de servicios y de problemas geotécnicos / estructurales lo que permitió reconocer las áreas de mayor ocurrencia de afectación en la infraestructura de servicios, información relevante a los fines de indagar en las causas que pudieran haber dado origen a las mismas y también para establecer relaciones con las fluctuaciones de niveles freáticos en sus distintos ciclos, con los tipos de suelo de cada sector y el grado de urbanización y consolidación urbana.

Sobre la base de los mapas de niveles freáticos extremos obtenidos, se realizó un análisis de mayor detalle en un sector de alta consolidación urbana de la ciudad seleccionado que

posibilitó generar un corte longitudinal del sector urbano seleccionado donde se incluyeron de manera georreferenciada los niveles isofreáticos máximos y mínimos, y los niveles topográficos (Lanzaro & D'Elia, 2021).

Sobre la base de información disponible del área de estudio, su sistematización e integración, se realizó una indagación exhaustiva de técnicas y sistemas de impermeabilización para obras subterráneas que posibilitó un nuevo análisis bajo un enfoque orientado a la definición de pautas y lineamientos para instrumentar acciones concretas en el desarrollo edilicio y urbano.

Este nuevo análisis sirvió de base para el desarrollo de una guía técnica para que todo proyecto de obra subterránea sea resultado de una evaluación del entorno medioambiental; del medio hidrogeológico; de un diseño estructural apropiado e incluyendo sistemas de impermeabilización adecuados a la obra en análisis. También se generó un catálogo de materiales disponibles en el país para impermeabilización subterránea clasificados conforme a la guía propuesta.

Se estudiaron las recomendaciones de la Norma BS 8102: 2009 “Código práctico para la protección de estructuras subterráneas frente a la acción del agua subterránea” (British Standards Institution, 2009), en cuanto a los requerimientos de proyecto y métodos o sistemas de impermeabilización para obras subterráneas. Y en cuanto a la seguridad estructural, para la determinación de la resistencia mecánica y estabilidad de estructuras, se analizó el (Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. CIRSOC 201, 2005) que integra el conjunto de reglamentos de seguridad estructural de construcciones civiles en el país.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La indagación técnica realizada, junto con la consideración de conceptos de mecánica de suelos, hidrogeología e ingeniería estructural relacionados con obras subterráneas, permitió establecer los principales factores y etapas que deben ser incluidos en cada proyecto, y ha dado lugar al desarrollo de una guía que brinda orientación sobre el cumplimiento de requisitos técnicos para una correcta ejecución de obras subterráneas. La Guía Técnica para el diseño de obras subterráneas define una secuencia de condicionantes que deben ser abordados (comprendidos y evaluados) para producir una protección óptima para cada obra subterránea (Figura 4).

La *Evaluación Preliminar (A)* incluye la caracterización de los condicionantes externos y específicos del medio en que se implanta la obra, considerando la influencia del entorno medioambiental y del medio hidrogeológico, el tipo de obra proyectada y su posición respecto a los niveles probables del agua subterránea durante toda la etapa de ejecución y de su vida útil, de lo que surgirá el tipo de exposición al agua y a la humedad a que estará sometida la obra, y la sollicitación mecánica para la que deberá estar calculada su estructura resistente (Figura 5).

La evaluación del *entorno medioambiental e hidrogeológico* debe incluir la indagación sobre la presencia de sustancias agresivas en el agua y suelo de contacto (principalmente sulfatos y cloruros), las posibles variaciones de temperatura, la presencia de influencias biológicas agresivas y de gases en el suelo (estas tres últimas no son relevantes en el área de estudio).

A su vez, corresponde evaluar el tipo de obra proyectada y su posición respecto a los niveles probables del agua subterránea durante el proceso de ejecución y a lo largo de toda la vida útil. En razón de ello, se debe evaluar el tipo de suelo, su permeabilidad y resistencia mecánica (aspectos que son considerados en los



Figura 4. Guía Técnica propuesta: secuencia de evaluación.

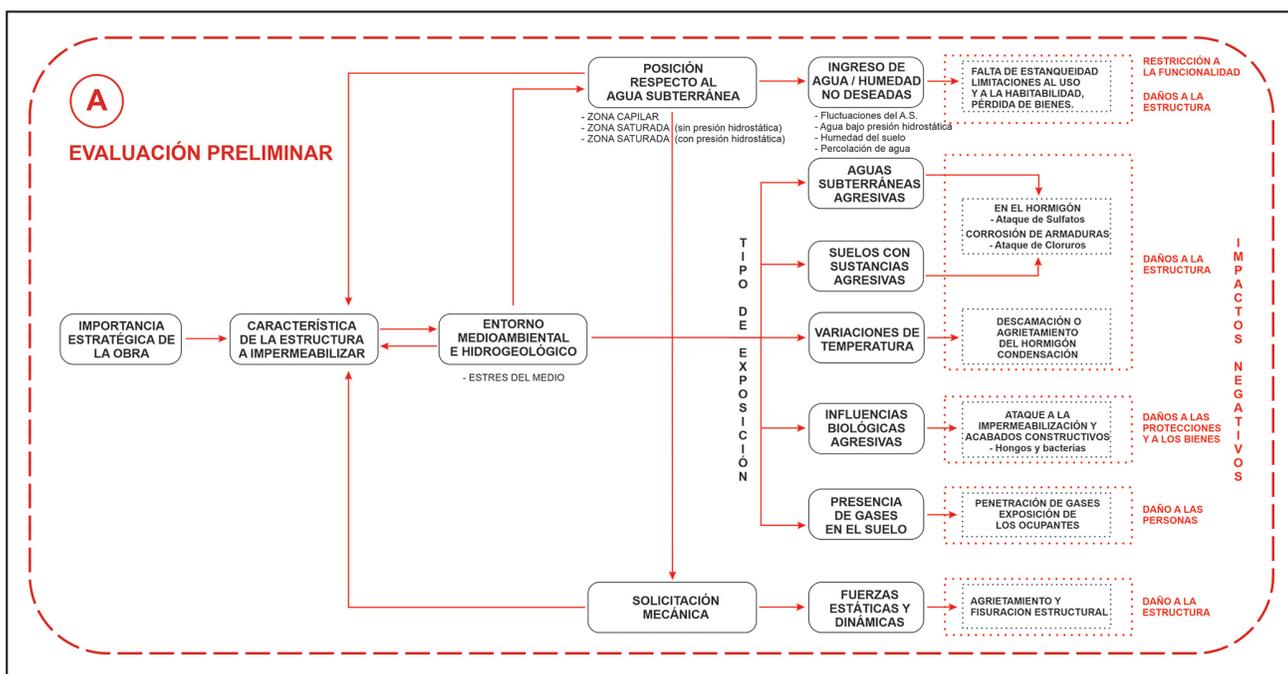


Figura 5. Guía Técnica para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo. Evaluación Preliminar. Fuente: Lanzaro, 2020.

estudios geotécnicos), y especialmente la acción del agua subterránea sobre la estructura, la cual surgirá de la posición de la obra respecto de los niveles freáticos y de cuyo análisis se determinará el riesgo de filtración o inundación, siendo primordial establecer el rango probable de fluctuaciones a lo largo del tiempo (Figura 6).

Todos estos aspectos, especialmente los relacionados a la ubicación de la obra respecto a los niveles freáticos, también influirán en la *solicitación mecánica* que deberá soportar la obra, por lo cual una adecuada evaluación de los mismos posibilitará generar un diseño estructural apropiado que considere empujes hidrostáticos de subpresión, empujes laterales, asentamientos, peso propio, sobrecargas de uso, cargas de viento si correspondiera, levantamiento de fondo, flotación, etc., según sea el tipo de obra.

En la Figura 6 se pueden observar las situaciones probables de posicionamiento de una obra subterránea respecto del nivel freático. En el primer caso, la construcción se encuentra inmersa completa o parcialmente, aunque sea de manera intermitente. Esta situación trae como consecuencia que todos los intersticios o poros del suelo estén llenos de agua, lo que presiona contra los muros de la construcción (1), correspondiendo una

impermeabilización con técnicas de estanqueidad. En el segundo caso, la construcción está permanente y completamente por encima del nivel freático. Esta situación trae como consecuencia que el terreno no esté saturado de agua, y el agua en contacto con los muros de la construcción no ejerce presión sobre ellos (2). La acción del agua se limita al movimiento ascendente por capilaridad (3). La impermeabilización requerirá tratamiento superficial de los muros subterráneos y piso inferior; y tratamiento impermeable para bloquear el ascenso por capilaridad de la humedad en lo alto de los muros soterrados.

Para cada caso presentado, existe una serie de medidas a tomar en cuanto a las técnicas de impermeabilización a adoptar, basadas en el modo y en el tipo de impermeabilización en cuanto a los puntos siguientes:

- *Impermeabilización en franja capilar (3)*: Debe ser efectuada en toda construcción subterránea, ya que se deben cerrar los poros del hormigón para evitar que la humedad llegue al interior por capilaridad. Se recomienda la utilización de: Pinturas y morteros impermeables. Escasamente membranas.

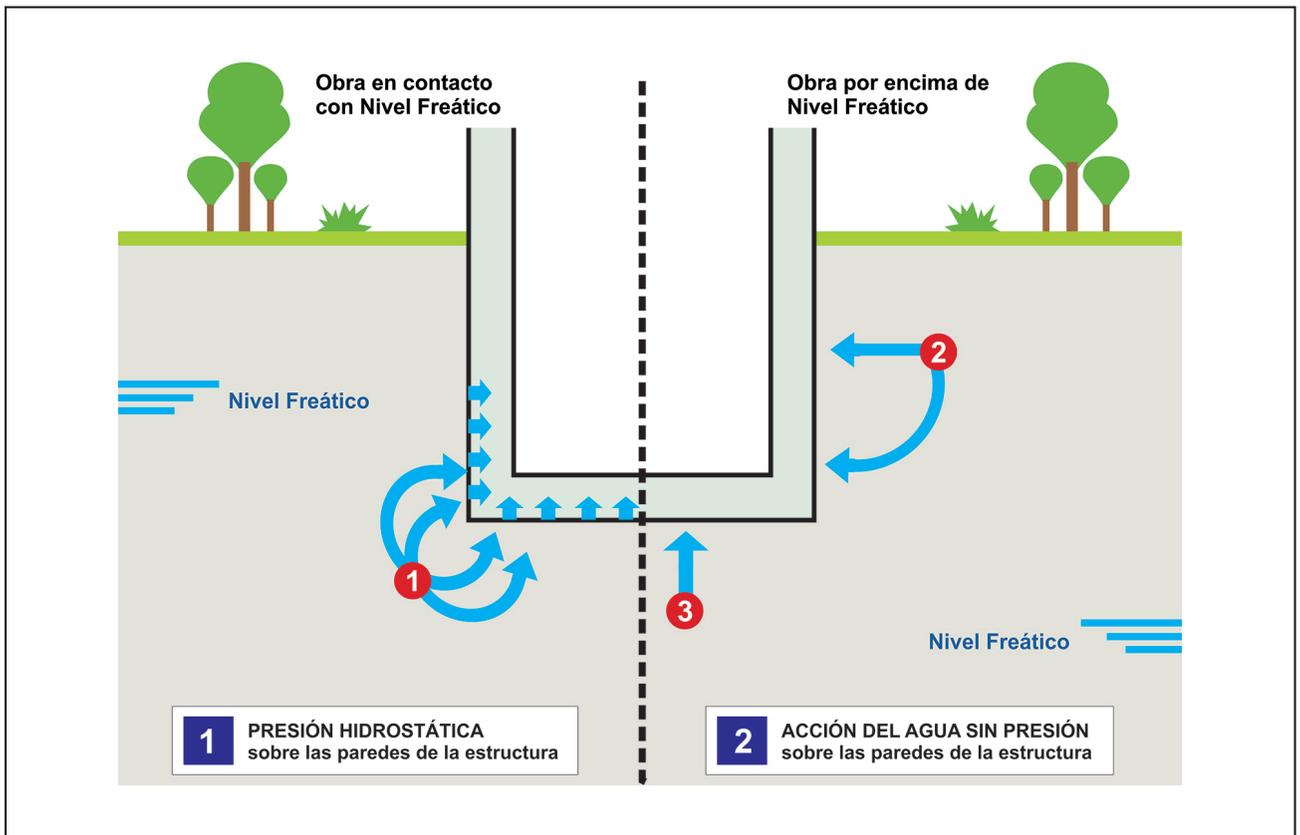


Figura 6. Acción que ejerce el agua sobre una estructura subterránea. Fuente: Lanzaro, 2020.

- *Impermeabilización en zona saturada, sin presión hidrostática (2):* Se debe desviar el agua para que no se genere presión. En general, el agua desviada se recoge en un drenaje longitudinal en la misma obra subterránea. Se recomienda la utilización de: Morteros hidrófugos. Membranas.
- *Impermeabilización en zona saturada, con presión hidrostática (1):* La obra está totalmente sumergida, se requiere una impermeabilización flexible y cerrada, y resistente a la presión del agua subterránea. Durante la construcción es necesario deprimir el nivel freático o eliminar el agua subterránea mediante técnicas con aire comprimido. Se recomienda la utilización de: Membranas. Escasamente morteros hidrófugos.

En este punto se reitera que para la elección del material de impermeabilización es de relevante importancia conocer la composición química del agua y del terreno de contacto ya que ciertas sustancias disueltas en ambos pueden atacar la impermeabilización.

A partir de la determinación de la posición de la obra subterránea respecto de los niveles freáticos, y como parte de la evaluación preliminar, es fundamental el *Análisis de las posibles situaciones de ingreso de agua o humedad no deseadas* que pueden devenir en las obras subterráneas, entre ellas:

- La capa freática, cuyo nivel puede fluctuar, debido a causas naturales por efecto de las precipitaciones y/o de altos niveles del agua en cursos superficiales cercanos; o debido a causas antrópicas como el cese de bombeo, riego, fugas en cañerías, etc., haciendo que el agua se

eleve por encima del nivel subterráneo más bajo del recinto subterráneo.

- La escorrentía de aguas subterráneas contra o infiltrando los tabiques exteriores de las partes soterradas del recinto.
- El ascenso capilar de la humedad, que puede hacer que el agua subterránea suba por los muros hasta el nivel de las áreas subterráneas en servicio de un edificio cuando está en contacto con y bajo la presión de un suelo saturado de agua.
- La percolación de agua dada por la recarga del acuífero mediante la infiltración en el suelo de contacto con la obra de aguas superficiales, precipitaciones o tareas de riego.

Estas cuatro primeras situaciones mencionadas se pueden remediar con sistemas adecuados de impermeabilización y de protección ante la presencia de agua. Por otra parte, existen factores que no son fruto de la filtración del agua subterránea a través de los tabiques exteriores de un edificio, pero suelen ser otras causas del deterioro de los materiales y de inconvenientes en cuanto al uso y funcionalidad de los edificios:

Las precipitaciones que por acción del viento golpean contra las fachadas de los edificios, pudiendo penetrar a través de las paredes y, dependiendo de la estructura del edificio, alcanzar las superficies interiores de los muros subterráneos bajo la fuerza de la gravedad o por atracción capilar.

La condensación del vapor de agua contenido en el aire húmedo en contacto con los muros fríos (insuficientemente aislados), en locales o instalaciones sin suficiente ventilación.

La fuga o vertido accidental de cañerías (suministro de agua, instalación cloacal, instalación pluvial, etc.) especialmente cuando las cañerías están integradas en la estructura del edificio.

En caso de que los aspectos y factores citados en la evaluación preliminar no sean evaluados e integrados al proyecto de una obra subterránea, se dará lugar a *impactos negativos* que afectarán el uso, la estanqueidad y la durabilidad, reduciendo la vida útil de toda la estructura.

Los impactos negativos ante diferentes niveles de *exposición al agua no deseada* (fluctuación del agua subterránea, presión hidrostática, humedad del suelo, percolación de agua o aguas abiertas) podrán dar lugar a restricciones a la funcionalidad ya que la falta de estanqueidad generará limitaciones al uso y a la habitabilidad, y hasta la posible pérdida de bienes materiales, y simultáneamente podrán provocar daños a la estructura. La *exposición a sustancias agresivas en aguas y suelos de contacto* podrá generar daños a la estructura como es el caso de los sulfatos que atacan al hormigón y los cloruros que corroen a las armaduras. La *exposición a variaciones de temperatura* podrá dar lugar a patologías de descamación o agrietamiento del hormigón y a situaciones de condensación. La *exposición a influencias biológicas agresivas* podrá dañar las protecciones de la obra y los bienes interiores ante el ataque de hongos y bacterias sobre las impermeabilizaciones y acabados constructivos. La *presencia de gases en el suelo* podrá afectar a los usuarios ante exposición por penetración de los gases al interior de los recintos. Asimismo, en caso de que la evaluación de la sollicitación mecánica no hubiera sido apropiada, podrá darse lugar a la aparición de *fuerzas estáticas desiguales* (debido a la carga, a asentamientos o levantamientos) y de *fuerzas dinámicas* (debido a asentamientos, explosiones, o movimientos importantes de la estructura) que impactarían negativamente en la resistencia y estabilidad de la estructura provocando patologías de agrietamiento y fisuración estructural.

Luego de conocidos y evaluados los condicionantes que ejerce el medio en que se emplaza la obra subterránea en estudio, habiendo analizado su posición respecto a los niveles probables del agua subterránea en el tiempo, conociendo las técnicas de impermeabilización apropiadas para cada caso y previendo las posibles situaciones de ingreso de agua o humedad se propone realizar una *Evaluación Específica (B)* para seleccionar el sistema de impermeabilización que requiere la obra en su situación particular. A partir del estudio del programa de necesidades de la obra, que define el destino de uso y en consecuencia los grados de estanqueidad, la durabilidad y la inversión prevista; se selecciona el sistema de impermeabilización que cumpla con las prestaciones esperadas en cuanto a la presión hidrostática detectada, al tipo

de barrera impermeable necesaria, al nivel de protección a la estructura, y a la durabilidad del sistema (Figura 7).

El grado de impermeabilización de toda estructura subterránea, incluidos muros, piso y cimientos, debe ser adecuado al uso interior previsto y al equipamiento a ubicar. Para definir la estrategia de impermeabilización adecuada y el tipo de sistema para un proyecto específico, se adoptaron las recomendaciones de la *Norma BS 8102: 2009* “Código práctico para la protección de estructuras subterráneas frente a la acción del agua subterránea”.

Como premisas básicas de la evaluación deben considerarse las condiciones y requerimientos del proyecto del propietario o comitente en cuanto a la funcionalidad, ya que el uso determinará el grado de estanqueidad necesario; en cuanto a la vida útil o durabilidad y en cuanto al costo total de la obra incluyendo el costo de mantenimiento.

La norma mencionada establece recomendaciones útiles y proporciona orientación sobre los métodos para tratar y prevenir la entrada de agua desde el suelo circundante a una estructura debajo del nivel del suelo. Para ello, clasifica la habitabilidad según cuatro niveles o grados de estanqueidad los cuales se definen por las condiciones de funcionamiento o habitabilidad requeridos para cada uso previsto. A la hora de evaluar los requerimientos del destino de cada obra subterránea, será de gran utilidad la consulta de la Tabla 1 que contiene un detalle de las utilidades que brinda cada nivel de estanqueidad, las condiciones de habitabilidad que proporcionan y el tipo de edificación compatible con cada nivel de protección.

Otro aspecto importante de los requerimientos del proyecto que condiciona la selección apropiada del tipo de impermeabilización que requiere cada obra subterránea es conocer el *rendimiento* de cada tecnología de impermeabilización con relación a su duración en el tiempo. En la Figura 8 se puede posicionar la performance de diversas tecnologías frente a los condicionamientos de servicio de una obra subterránea.

En relación a la inversión total de la obra subterránea a ejecutar corresponde internalizar no solo los costos de construcción para toda la vida útil de la estructura, incluida la inversión inicial, sino también el costo de cualquier pérdida o daño a los bienes interiores debido al ingreso de agua, el costo de cualquier reparación y mantenimiento, más el costo de cualquier tiempo de inactividad durante tales trabajos. De acuerdo con esto, en la Figura 9 se presenta un esquema donde se visualiza la inversión inicial por cada tipo de impermeabilización y aún para casos sin protección impermeable. Asimismo, se observa en contraste a la inversión inicial, aquella requerida para mantenimiento,

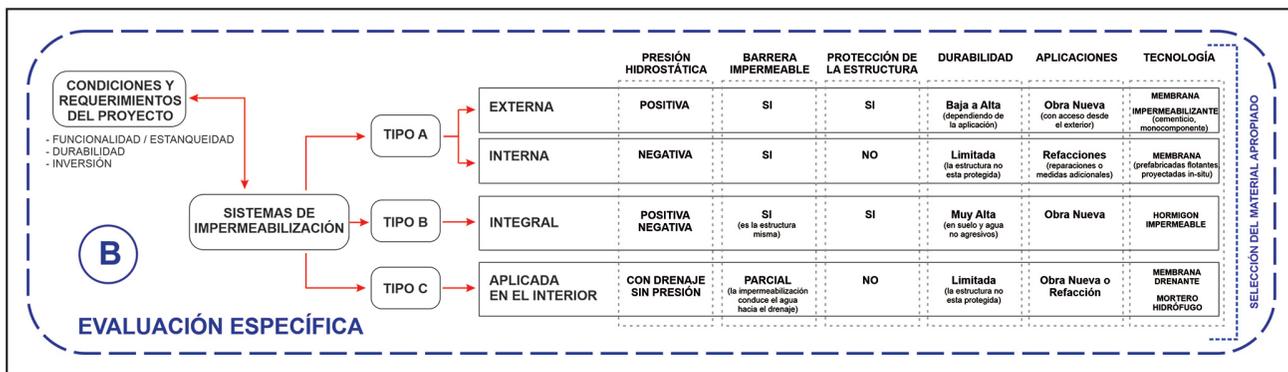


Figura 7. Guía Técnica para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo. Evaluación Específica. Fuente: Lanzaro, 2020.

Tabla 1. Grados de estanqueidad en obras subterráneas. Fuente: Norma BS 8102:2009.

Grado	Uso	Condiciones	Estructuras
1	Utilidad básica	· Sin penetración de agua. · Algo de humedad. · Vapor tolerable dependiendo del uso.	Cocheras subterráneas, talleres, salas de máquinas, fosos de ascensores, etc.
2	Mejor utilidad	· Sin penetración de agua. · Ambiente seco. · Puede requerir ventilación dependiendo del uso.	Cocheras subterráneas, áreas de almacenamiento, talleres, salas eléctricas, etc.
3	Habitable	· Sin penetración de agua. · Ambiente absolutamente seco. · Con ventilación y deshumidificación.	Unidades residenciales y oficinas ventiladas, restaurantes y zonas comerciales, instalaciones recreativas.
4	Grado 3 Habitable + plus	· Uso con ventilación y acondicionamiento de aire. · Protección ante la penetración de gases. · Protección ante agentes químicos y biológicos.	Unidades residenciales y de oficinas, salas de informática, archivos, áreas e instalaciones especiales como laboratorios.

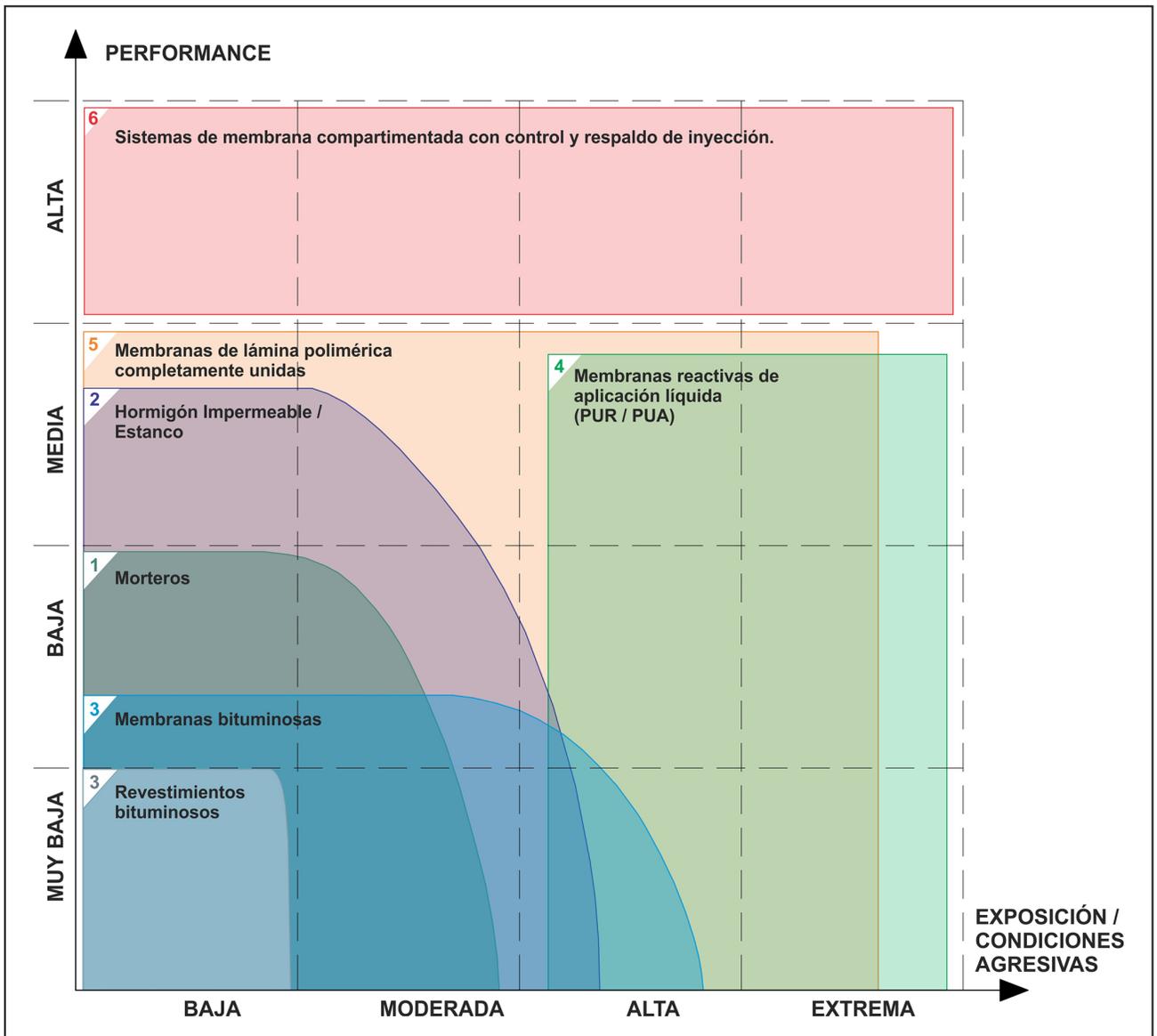


Figura 8. Rendimiento de tecnologías de impermeabilización. Fuente: Sika S.A., 2018.

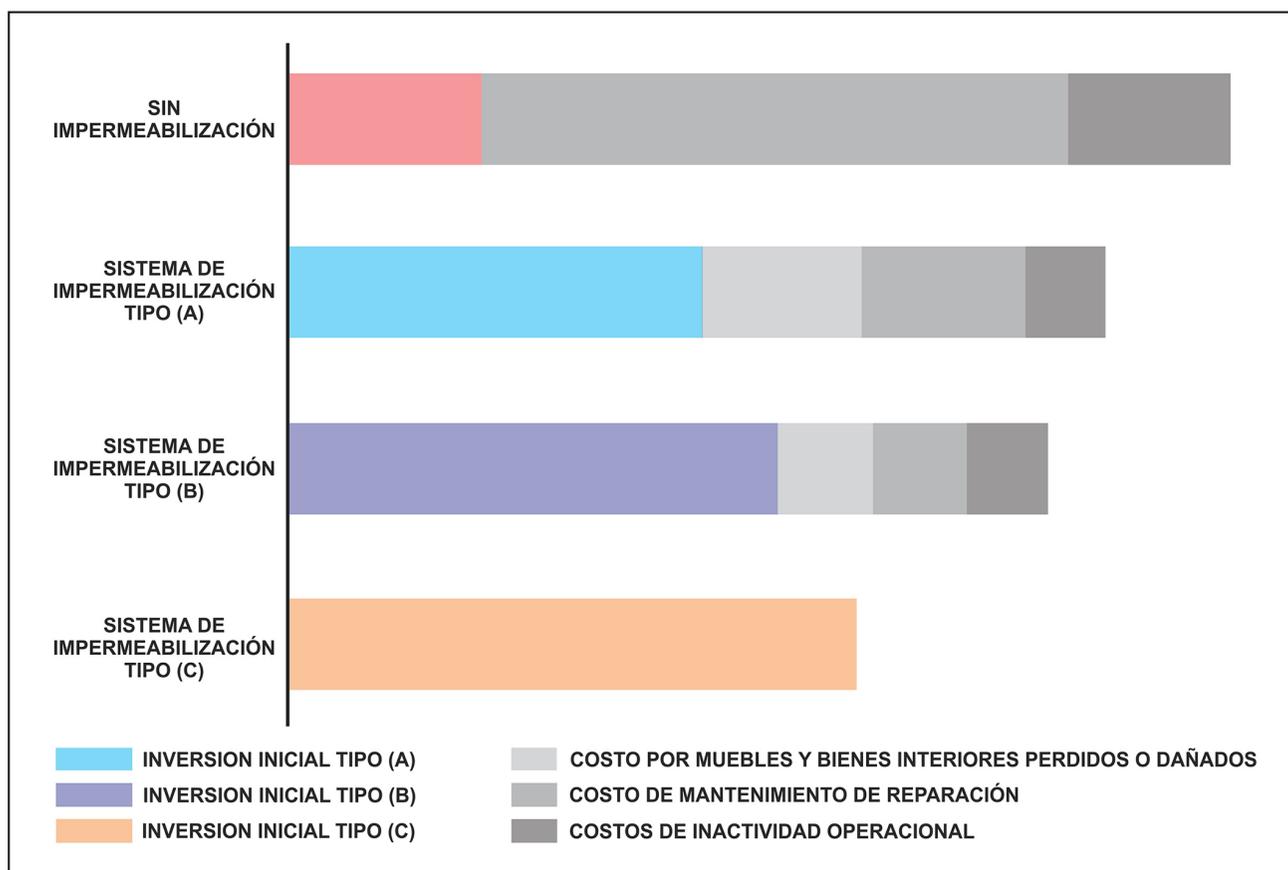


Figura 9. Inversión inicial para cada sistema de impermeabilización. Fuente: Sika S.A., 2018.

reparaciones, pérdidas e inactividad operacional. Esta lógica debe estar presente tanto en proyectistas y ejecutores de la obra, y fundamentalmente en los propietarios, a fin de evitar situaciones indeseables en el futuro.

Por todo lo mencionado, es posible comprender que el sistema de impermeabilización incide directamente en el tiempo de vida útil de la estructura, pudiendo establecerse las siguientes relaciones:

- Sin impermeabilización = Vida útil promedio de 10 años.
- Bajo grado de impermeabilización = Vida útil promedio de 20 años.
- Medio grado de impermeabilización = Vida útil promedio de 45 años.
- Alto grado de impermeabilización = Vida útil promedio de 100 años.

La impermeabilización de los distintos tipos de obras subterráneas tiene una gran importancia tanto técnica como económica; y contribuye considerablemente a la calidad y a la durabilidad de estas. Por otra parte, será importante no tener exigencias innecesariamente elevadas que no estén en relación con el uso de la obra, porque ello tendrá importantes consecuencias, tanto para las especificaciones técnicas como para el costo de la obra.

Para dotar a una obra del nivel de estanqueidad determinado en los requerimientos del proyecto, y dar solución a los condicionantes externos y específicos evaluados en relación con el

entorno y con la posición de la obra respecto a los niveles del agua subterránea, existen distintos *Métodos o Sistemas de Impermeabilización*. La norma BS 8102: 2009 identifica tres métodos o sistemas de impermeabilización diferentes (Figura 10), los que se describen a continuación:

· *Sistema de impermeabilización externo (tipo A):*

Barrera impermeable aplicada a las superficies externas que están expuestas al agua subterránea (lado positivo). La estructura está protegida contra la entrada de agua y también contra sustancias o influencias agresivas. Para algunos materiales, como los morteros y recubrimientos de aplicación posterior, se requiere el acceso a las superficies externas para su aplicación después del hormigonado.

· *Sistema de impermeabilización interno (tipo A):*

Barrera impermeable aplicada en las superficies internas de la estructura (lado negativo). Estos sistemas no evitan el daño a la estructura por ingreso de agua, ni el daño al hormigón y armaduras debido a sustancias químicas agresivas. En general, estos sistemas se aplican como revestimientos o recubrimientos de membrana laminar, y se recomiendan para trabajos de renovación, en los que no es posible acceder a las superficies directamente expuestas.

· *Sistema de impermeabilización integral (tipo B):*

Es un sistema de impermeabilización integrado en la estructura de hormigón. La penetración de agua líquida

es detenida por la propia estructura y no puede pasar al recinto interior. Los productos típicos son aditivos para hormigón estanco combinado con sistemas apropiados de sellado de juntas para conexiones, juntas de construcción y juntas de movimiento.

· *Sistema de impermeabilización aplicado internamente (tipo C):*

El sistema dirige la penetración de agua en un sistema de drenaje y un colector de recolección, luego por bombeo se descarga el agua del recinto hacia el exterior del edificio. El drenaje asegura la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes o canaletas longitudinales que deben tener el diámetro suficiente y sus aberturas

de entrada proporcionales al agua de filtración esperada. Estos sistemas no evitan el daño a la estructura por la entrada de agua, ni el daño al hormigón y armaduras debido a sustancias químicas agresivas.

La norma recomienda, para aquellos casos donde los riesgos evaluados se consideren altos o las consecuencias de no lograr el entorno interno requerido sean demasiado altas, que se considere el uso de *sistemas duales*, por ejemplo, la protección Tipo A más la Tipo B. El nivel de exigencia de cada obra subterránea determinará el nivel de medidas de precaución a tomar frente a la penetración de agua, pero en todos los casos es recomendable usar un hormigón de baja permeabilidad, ya que arreglar una fuga puntual es más sencillo que detener un problema generalizado sobre el paramento de hormigón.

Tabla 2. Tecnologías de impermeabilización en estructuras subterráneas. Fuente: Norma BS 8102:2009.

Ubicación	Procedimiento	Tecnología / Materialidad
HORMIGÓN	Impermeabilización de la masa con aditivos hidrófugos, reductores de agua, superplastificantes, reductores de retracción	<ul style="list-style-type: none"> · Modificación de la estructura capilar del hormigón. · Tecnología de bloqueo de poros. · Tecnología por cristalización.
JUNTAS	Control y sellado de juntas y pasadores en uniones. Juntas de construcción y de dilatación.	<ul style="list-style-type: none"> · Perfiles preformados. · Perfiles hidro-expansibles. · Inyecciones puntuales / Mangueras de inyección. · Cintas adhesivas.
ENVOLVENTE	Barreras impermeables.	Revestimientos / recubrimientos: <ul style="list-style-type: none"> · cementicios. · asfálticos / bituminosos. · preformados.

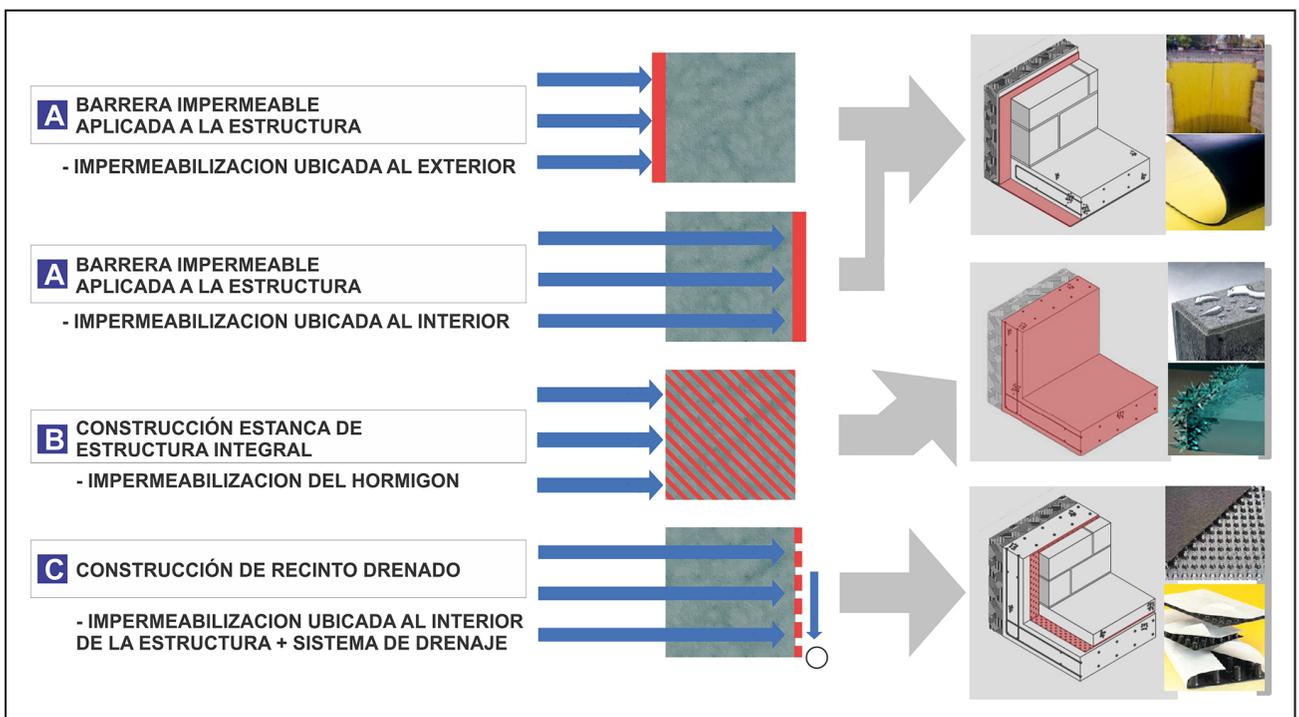


Figura 10. Sistemas de impermeabilización para obras subterráneas. Adaptado de la Norma BS 8102: 2009.

La guía técnica para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo permitirá que los proyectos de obras subterráneas incluyan los factores fundamentales para alcanzar los niveles de protección requeridos. Aunque, la efectividad de las protecciones también dependerá de la buena ejecución de la obra, lo cual demandará mano de obra calificada, adecuado control de calidad del proceso constructivo y de cumplimiento de las especificaciones técnicas del proyecto y recomendaciones del fabricante de cada material.

Los recintos subterráneos insuficientemente impermeabilizados necesitan una importante inversión en mantenimiento debido a los desperfectos tanto de las instalaciones mecánicas como al deterioro de la estructura de hormigón del recinto. Por estas razones resulta esencial realizar un estudio previo para poder escoger el mejor tipo de impermeabilización que se le va a aplicar a la estructura y así evitar gastos innecesarios.

Los riesgos inherentes a las obras subterráneas deben ser identificados, analizados, mitigados y gestionados adecuadamente. La incertidumbre geotécnica resultante de la falta de conocimiento de las condiciones hidrogeológicas; de la falta de consideración de las fluctuaciones del agua subterránea en el tiempo; de la respuesta impredecible del terreno ante las excavaciones; y de la compleja interacción suelo-estructura, influye en la seguridad estructural de toda obra, pero especialmente en aquellas subterráneas, tanto en su etapa de ejecución como a lo largo de toda la vida útil.

A nivel urbano, la complejidad de interacciones, los problemas y las necesidades de gestión relacionados con las aguas subterráneas y el entramado edilicio y de infraestructura que se encuentra alojado en el subsuelo, demanda su regulación; para protección del recurso hídrico y del suelo ante posible contaminación; para brindar seguridad estructural a las nuevas construcciones tomando medidas que apunten a la durabilidad de los materiales, a proveer el nivel de habitabilidad requerido para cada tipo de recinto subterráneo; para dotar de seguridad a las obras linderas existentes; y para que la prestación de los servicios públicos sea eficiente y sustentable minimizando las fugas y colapsos de la infraestructura.

Las pautas técnicas de la guía son factibles de ser implementadas a nivel local a fin de avanzar hacia la regulación del subsuelo de la ciudad, pudiendo ser integradas al Código de Habitabilidad Ordenanza N° 12.783/2021 que recientemente ha reemplazado al Reglamento de Edificaciones, Ordenanza N° 7.279/76, para que la aprobación técnico-administrativa de proyectos que contengan obras subterráneas cumplan estándares mínimos que provean seguridad y habitabilidad a las mismas. Es de destacar que el conjunto de conocimientos, metodologías y recomendaciones presentadas son válidas para el proyecto, ejecución y puesta en servicio de obras subterráneas en otros entornos urbanos que enfrenten similar problemática.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

La conceptualización; indagación técnica; relevamientos de campo; análisis de datos; redacción y preparación del borrador original; redacción, revisión y edición del manuscrito final estuvieron a cargo de la autora del artículo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

La Autora declara que no existe ningún conflicto de interés.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. (2009). BS 8102: 2009.

Code of practice for protection of below ground structures.
England.

CHILTON, J. (1997).

Groundwater in the urban environment. Volume 1: Problems, processes and management.
XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment (págs. 1-682). Nottingham: Balkema.

CUSTODIO, E. (2004).

Hidrogeología urbana: Una nueva rama de la ciencia hidrogeológica.
Boletín Geológico y Minero, 115, Número Especial, 283-288.

D'ELIA, M. P., PARIS, M., TUJCHNEIDER, O., PÉREZ, M., PAGLIANO, M. L., GUALINI, S., & FEDELE, A. L. (2011).

Agua subterránea en áreas urbanas.
VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrogeología Subterránea. Captación y Modelación de Agua Subterránea, (págs. 46-53). Salta.

DÁVILA PORCEL, R. A., & DE LEÓN GÓMEZ, H. (2011).

Importancia de la hidrogeología urbana: ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible.
Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 463-477.

FOSTER, S., LAWRENCE, A., C MORRIS, B. (1998).

Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano.
Evaluación de necesidades de gestión y formulación de estrategias. Documento técnico N° 390. Washington D.C.: Banco Mundial.

GEBREMEDHIN, B., TESFAHUNEGN, A., & SOLOMON, G. (2013).

Implications of groundwater quality to corrosion problem and urban planning in Mekelle area, Northern Ethiopia.
Momona Ethiopian Journal of Science - Vol 5, 51-70.

LANZARO, M. V. (2020).

El agua subterránea como condicionante ambiental de construcciones subterráneas en áreas urbanas.

- El caso de la ciudad de Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina.
Tesis de Maestría. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe.
- LANZARO, M. V., & D'ELIA, M. P. (2021).
Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, (46), 25-42. Recuperado a partir de <https://www.editoriasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia/article/view/197>
- LERNER, D. N. (1990).
Groundwater recharge in urban areas.
Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas (págs. 59-65). Duisburg: IAHS - International Association of Hydrological Sciences .
- LERNER, D. N. (1997).
Too much or too little: Recharge in urban areas.
En Chilton et al., Groundwater in the Urban Environment: Volume 1: Problems, processes and management. Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment (págs. 41-48). Nottingham: Balkema.
- PAGLIANO, M. L. (2008).
Evaluación de las posibilidades de recarga en áreas urbanas.
XII Encuentro de Jóvenes Investigadores de la UNL. III Encuentro de Jóvenes Investigadores de Universidades de Santa Fe. Santa Fe.
- REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN. CIRSOC 201. (2005).
Buenos Aires, Argentina. Recuperado a partir de <https://www.inti.gob.ar>.
- SHANAHAN, P. (2009).
Groundwater in the urban environment.
En L. A. Baker, The water environment of cities (págs. 29-48). Cambridge: Springer Science+Business Media.
- SIKA S.A. (2018).
Hormigón: Estructuras Subterráneas Impermeables.
(Boletín del Departamento de desarrollo tecnológico de Sika®).
https://arg.sika.com/content/dam/dms/ar01/7/Hormigon_EstructurasSubterraneas_2018.pdf
- VÁZQUEZ-SUÑÉ, E., SÁNCHEZ-VILA, X., & CARRERA, J. (2005).
Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain.
Hydrogeology Journal 13, 522-533.
- VÁZQUEZ-SUÑÉ, E., SÁNCHEZ-VILA, X., CARRERA, J., & MARIZZA, M. (1997).
Rising groundwater levels in Barcelona: Evolution and effects on urban structures.
En C. e. al., Groundwater in the Urban Environment: Volume 1: Problems, processes and management. Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment (págs. 267-271). Nottingham: Balkema.