

Topology for health care facilities' design

Pilar Chias, Tomás Abad



Mathematical concepts applied to painting, as well as to architectural design, arise frequently from intuition. The important role they play in design processes is being currently vindicated, as it is evidenced by artists and mathematicians as Lucio Saffaro. Topology is concerned with the properties of spaces that are preserved under continuous deformations, and has proved to be particularly useful in the previous stages of the architectural projects, when the location of uses and itineraries is defined. On the other hand, topology brings lots of possibilities in those phases of design where no dimensional definition is needed, but just to satisfy some spatial properties. It becomes then a powerful easy tool to show and analyse different solutions by means of their spatial relationships. Concepts as adjacency, connectedness, intersection, or inclusion, can be directly applied to layout schemes, setting the basis to further dimensioning. These concepts are traditionally managed and implemented by Geographic Information Systems (GIS), and are now being applied to architecture by means of Building Information Models (BIM). As a particular use, the architectural design of hospitals and other health care facilities benefits directly from topology's properties. It is due, firstly, to their high complexity derived from their particular technical, functional, and equipment constraints. Secondly, topology becomes helpful to design the inner and outer itineraries of both people and logistics, paying attention to the specific problems derived from transfer points, pollution risks, and intersections. And thirdly, it permits to take into account the various possible users: patients, visitors, accompanying persons, staff, logistics suppliers, etc. The case study is a result of the research project (BIA2016-78893-C3-1-R) funded by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness, and the EU.

Keywords: Architectural Project, Hospitals, Topology.

Main Targets and Precedents

Application of mathematical concepts to various art fields and design practices was usual throughout History. However, researches and artistic expressions focused mainly on aspects related to proportion, perspective or geometric shapes. There were several ways to give shape to these thoughts, but intuition prevailed against more geometrically rigorous models. In fact, *Le forme del pensiero* was the suggestive title of a documentary film about Lucio Saffaro's work that was produced by the RAI Educational and directed by G. Boetto Cohen in February 2014. During the national congress *Incontri con la Matematica* at Castel San Pietro, Saffaro stated «con la matematica si può fare anche arte di alto livello» (D'Amore 2014, p. 193). He was known as “the last artist of Renaissance” because he used to follow Albrecht Dürer in the tradition of exploring the possibilities of

three-dimensional geometry (Panofsky 1947). From the starting point of this shared interest on mathematics and its possibilities to be graphically expressed, the capability of drawing to communicate the qualities of space must be stressed. As long as topology is concerned with the properties of space that are preserved under some continuous deformations – such as stretching, crumpling or bending – they can be graphically depicted and applied to many purposes. The architectural project can benefit of these possibilities from the early design stages, because topology opens a big range of possible solutions that can be easily shown in a flexible manner, and comprehensive spatial analysis can be made. It is due to topology's capability to transmit the project's general order in every phase before dimensioning. All these utilities can be considered as an essential complement to other

La topología en el diseño de los centros asistenciales

Pilar Chias, Tomás Abad

Los conceptos matemáticos que se aplican en la pintura y en el diseño arquitectónico son frecuentemente producto de la intuición. El importante papel que ambos juegan en los procesos de diseño está siendo recientemente reivindicado, como pone de manifiesto la obra de artistas y matemáticos como Lucio Saffaro. En particular, la topología se ocupa de las propiedades de los espacios que se mantienen bajo deformaciones continuas, y ha demostrado ser particularmente útil en las etapas iniciales del proyecto de arquitectura, cuando se define la ubicación de los usos y las circulaciones. Por otra parte, la topología ofrece múltiples posibilidades en aquellas fases del diseño en las que no se requiere una definición dimensional, sino solamente satisfacer ciertas propiedades espaciales. Por tanto, se convierte en una herramienta fácil y poderosa para representar y analizar varias soluciones diferentes a través de sus relaciones espaciales. Conceptos como contigüidad, conectividad, intersección o inclusión, pueden aplicarse directamente a los esquemas de planta y plantear las bases para el futuro dimensionamiento. Estos conceptos se utilizan habitualmente en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y están aplicándose recientemente a la escala arquitectónica a través de los Modelados de Información de Construcción (BIM). El diseño de hospitales y centros asistenciales constituye una aplicación particular que se beneficia directamente de las propiedades topológicas. Ello se debe en primer lugar a su elevada complejidad derivada de sus particulares exigencias técnicas, funcionales y de equipamiento. En segundo lugar, la topología resulta de gran utilidad en el diseño y organización de los recorridos interiores y exteriores, tanto para el público como para la logística, prestando especial atención a los problemas específicos que surgen en los puntos de transferencia, a los riesgos de contaminación y a las intersecciones. En tercer lugar, permite considerar a todos los posibles usuarios: pacientes, visitantes, acompañantes, empleados, suministradores, etc. El caso de estudio es un resultado del proyecto de investigación (BIA2016-78893-C3-1-R) financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España.

Palabras clave: hospitales, proyecto arquitectónico, topología.

Objetivos principales y antecedentes

La aplicación de los conceptos matemáticos en los diferentes ámbitos del arte y del diseño ha sido una práctica habitual a lo largo de la Historia. Sin embargo, tanto las investigaciones sobre el tema como las manifestaciones artísticas se han centrado preferentemente en aspectos como la proporción, la perspectiva o las formas geométricas. Existen varias maneras de dar forma a estos pensamientos, pero la intuición ha prevalecido frente a los modelos geoméricamente más rigurosos. De hecho, *Le forme del pensiero* fue el sugerente título del documental que, sobre la obra de Lucio Saffaro, fue producido por la RAI Educativa y dirigido por G. Boetto Cohen en febrero de 2014. Durante el congreso nacional *Incontri con la Matematica* en Castel San Pietro, Saffaro afirmó «con la matematica si può fare anche arte di alto livello» (D'Amore 2014, p. 193). Se

le conoció como “el último artista del Renacimiento” porque siguió la tradición de Alberto Durero de explorar las posibilidades de la geometría en tres dimensiones (Panofsky 1947). Partiendo del interés compartido por las matemáticas y de las posibilidades de ser expresadas gráficamente, hay que destacar la capacidad del dibujo para comunicar las cualidades espaciales. En la medida en que la topología aborda las propiedades de los elementos en el espacio que se mantienen bajo ciertas deformaciones continuas – como el estiramiento o el doblado – pueden ser representadas gráficamente y tienen múltiples aplicaciones. Entre ellas, el proyecto de arquitectura se puede beneficiar de estas posibilidades desde sus primeras fases, pues a través de la topología se puede mostrar un amplio abanico de posibles soluciones de manera fácil y flexible, así como abordar un análisis espacial integral.

mathematica-based artistic or theoretical and speculative expressions. Thus it is important to explore a feasible way for building the connectivity relationships among spatial – architectural – features. Three types of methods for topology network deviation are mainly used: the pure geometry-based (Lee 2001), the geometry- semantics based – which is our particular interest – and the pure semantics-based (Lorenz *et al.* 2006).

As a main innovative contribution, our research focuses on comparing two possibilities for studying spatial relationships in complex architecture, as are space syntax and 3D modelling BIM techniques. The comparison will show the scope of topological properties and relationships when applied to a hospital's project. On the other hand, they were developed by modern information and communication technologies (ICT), and both are based on topological concepts and properties as adjacency, connectivity, intersection, or inclusion (Egenhofer and Herring 1990; Van Oosterom 1993; Zlatanova *et al.* 2002).

The space syntax theory was traditionally based on topology, and basically applied to studies dealing with accessibility and connectivity between urban spaces or complex architectural organisations (Penn *et al.* 1998; Hillier 1996). However, space syntax concerns geometric connectivity of spaces, and is only based on spatial links, while aspects as easiness or difficulty of indoor movements are neglected. The introduction of other factors as distance, time, resistance to the user's flows – impedance – or connections between different indoor space levels, was a step ahead to deal with spatial problems. These advances implied a conceptual and operational change from 2D GIS packages to 3D models (Kim *et al.* 2008).

The proposed case study deals with hospitals and big healthcare facilities. The choice is justified because they are essential for producing high quality health services, while their complexity derives not only from their particular technical, functional, and equipment constraints, but also from considering the itineraries of the various possible users – patients, visitors, accompanying persons, staff, logistics suppliers, etc. Participation of all types of users must be

always taken into account in hospital design. The utility and applicability of mathematics to architectural design is evident in space syntax and 3D modelling, as they both focus on operating objectives through analytical means such as accessibility, which are required for better spatial plans or guidance purposes for people and logistics. Topology helps to pay attention to specific problems derived from transfer points, intersections and pollution risks.

As a result, recent technologies as location-based services (LBS) and mobile applications (apps) that are being applied to users' navigation, are also useful to the new "eHealth" concepts, as well as in hospitals' indoor and outdoor guidance systems.

Methodology

The analysis of spaces and indoor and outdoor itineraries deal with two main questions: on the one hand, it is necessary to know the existing topological relationships between rooms and the network of lines representing the possible itineraries. On the other hand, it becomes essential to consider the qualities associated to these itineraries, together with other aspects related to users' welfare, in order to get a comprehensive useful information to be applied to the architectural project.

The proposed methodology is based on the comparison between 2D space syntax and 3D modelling methods, and their respective capabilities to be used in complex architectural design. Users' movements are usually described in an abstracted form by means of their topological properties, that permit to focus on the structural relationships between units while disregarding the details of phenomena. For instance, the public itineraries inside a hospital can be described using a structure of shapes and lines without considering essential details as sizes or forms, number of users or speed of movement (fig. 1). Such network configuration can be also referred to as a graph or diagram, which is a way to represent a network by a set of edges that connect pairs of vertices.

Similarly, spaces and departments inside the hospital are represented in space syntax as a set of connected discrete units, in spite of being a single continuous space. The concept

Figure 1
Topological concepts and properties applied to public indoor and outdoor itineraries' design in a hospital or in a complex healthcare facility.

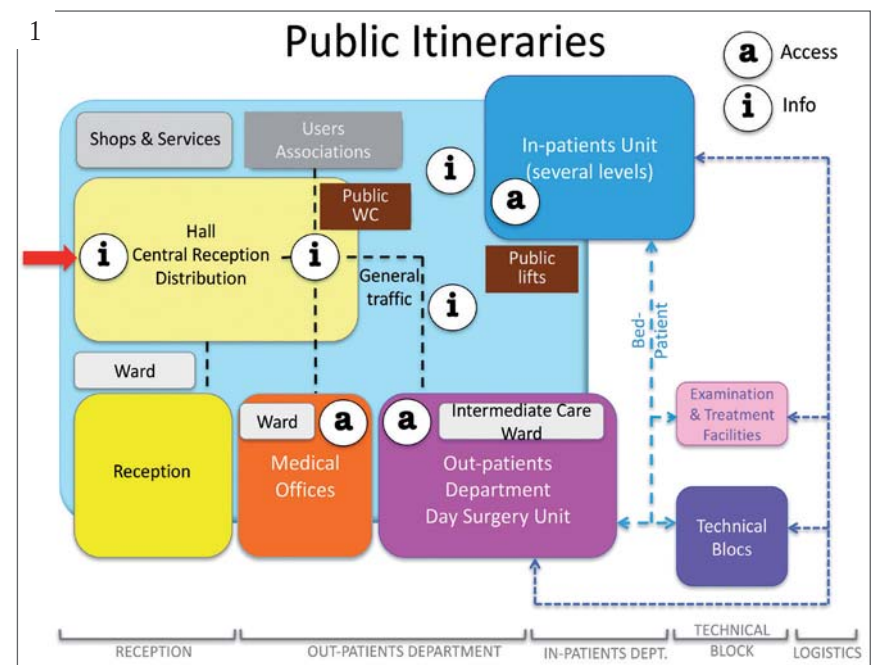
Ello es posible gracias a la capacidad de la topología de transmitir el orden general del proyecto en cada fase previa al dimensionado. Estas aplicaciones se pueden considerar un complemento imprescindible para otras manifestaciones artísticas también basadas en conceptos matemáticos, así como para otras investigaciones teóricas o expresiones especulativas. En consecuencia, es importante explorar modos adecuados para construir las conexiones de conectividad entre los elementos espaciales – arquitectónicos – y para ello se utilizan principalmente tres tipos de metodologías: las basadas estrictamente en aspectos geométricos (Lee 2001), las geométrico-semánticas – que son las que nos afectan – y las puramente semánticas (Lorenz *et al.* 2006). Como principal aportación innovadora, nuestra investigación se propone el objetivo de comparar dos de las principales posibilidades de estudio de las relaciones espaciales en arquitecturas complejas: la sintaxis espacial y las técnicas BIM de modelado espacial. La comparación mostrará el alcance y posibilidades de topología en ambos casos. Por otra parte, ambas fueron desarrolladas por medio de las modernas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), y se basan en conceptos y propiedades topológicas como la contigüid-

ad, la conectividad, la intersección o la inclusión (Egenhofer and Herring 1990; Van Oosterom 1993; Zlatanova *et al.* 2002).

La teoría de la sintaxis espacial se ha basado tradicionalmente en la topología y se ha aplicado en estudios relacionados con la accesibilidad y la conectividad en los espacios urbanos o en organizaciones arquitectónicas complejas (Penn *et al.* 1998; Hillier 1996). Sin embargo, la sintaxis espacial afecta a la conectividad geométrica de los espacios y se basa sólo en vínculos espaciales, eludiendo otros aspectos importantes como la facilidad o incomodidad de los recorridos internos. La introducción de otros factores como la distancia, el tiempo, la resistencia a los flujos de usuarios – impedancia – o las conexiones entre distintas plantas o niveles interiores, supuso un avance en el estudio de los problemas espaciales. Estos avances impulsaron un cambio conceptual y operativo desde los GIS 2D a los modelos 3D (Kim *et al.* 2008). El caso de estudio que proponemos afecta a hospitales y grandes centros asistenciales. La elección se justifica porque en ambos resulta fundamental proporcionar servicios sanitarios de alta calidad, mientras su complejidad no sólo responde a sus elevadas exigencias técnicas, funcionales y de equipamiento, sino también a los recorridos de todos los posibles usuarios – pacientes, visitantes, acompañantes, empleados, suministradores, etc.

La utilidad y posibilidades de aplicación de las matemáticas al diseño arquitectónico es pues evidente en la sintaxis espacial y el modelado 3D, pues ambos se centran en objetivos funcionales a través del análisis de la accesibilidad que son exigibles para lograr mejores organizaciones espaciales y para mejorar la orientación de los usuarios y la logística. La topología ayuda a prestar atención a los problemas específicos que surgen en los puntos de transferencia y en las intersecciones, y en los riesgos de contaminación.

Como resultado, las recientes tecnologías basadas en servicios de localización (LBS) y las aplicaciones móviles (apps) que se están utilizando para la navegación de los usuarios, son también muy útiles en los nuevos conceptos de eSalud y en la orientación interior y exterior por los hospitales.



of convex space partitioning or axial mapping is used, what involves taking a proposed spatial structure and partitioning into a set of "fewest and fattest" convex spaces (Hillier and Hanson 1984, pp. 97–98).

The procedure for generating the convex maps is iterative. It starts with the identification of the fattest of the convex spaces, and then identifies gradually the next largest ones until the entire area is subdivided into a set of convex spaces. The axial map is then drawn on the convex map by laying down the longest straight line passing through these convex spaces (fig. 2). It implies a different procedure with respect to the traditional way of representing a street network, that uses center street lines and the corresponding intersections. On a graph, space syntax represents each line by a node and each intersection as an edge, while in the traditional method the situation is *vice versa*. It means that an intersection becomes a node, and a line connecting two nodes is an edge.

All these depictions are traditionally produced by means of 2D representations, which are easily checked and analysed. On the other hand, the difficulties found in spatial analysis lie in the inherent limitations of 3D models, as they were developed focusing on visualisation of buildings or towns, and fostering the appearance of reality. As a consequence, these models lack of the topological structures that are required for spatial analyses or queries, as their objects are not divided into spatial units and relationships between them are undefined. A first solution consists in constructing a 2D model and to associate the respective three-dimensional datasets. In this case, indoor spaces are composed of polygons representing hallways, wards, and all types of spaces, while their relationships can be clearly defined by means of GIS layout schemes through topology. To apply this method to a 3D building, a data model must be produced representing both rooms and itineraries using a network model composed of links and nodes, where nodes represent doors and entrances. Obviously, emergency exits take priority to other. Axial links connect nodes along the center lines of hallways and corridors, and resistance to the flow – impedance – is categorized into diffe-

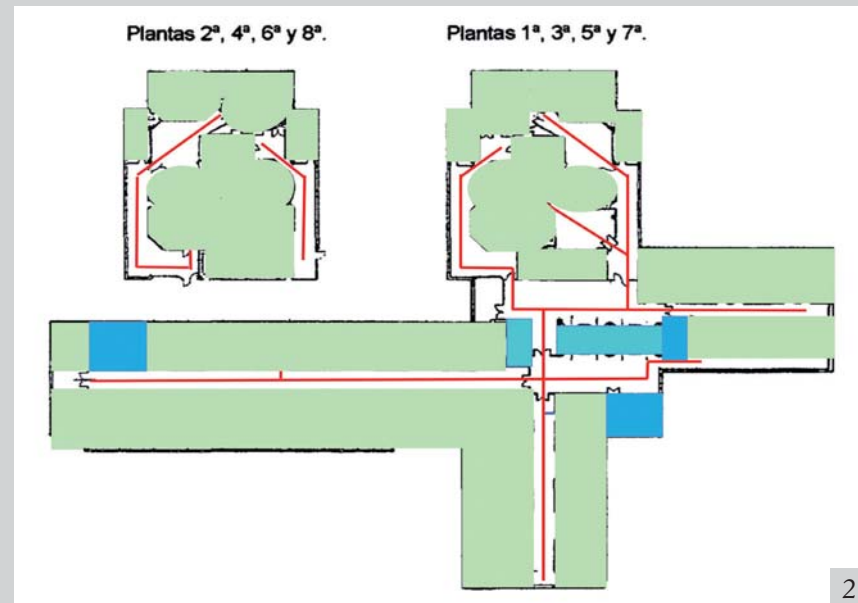


Figure 2
Axial map. Hospital Universitario La Paz, Madrid, Spain.

rent values according with different strengths. Third dimension is mapped as stair and lift links (fig. 3). As a precedent, GIS support many possibilities of analysis that can be easily made, as for instance, the impedances due to turns or floor transfers, optimal paths, or accessibility to the exits from each space (Ahuja *et al.* 1993). On the other hand, graphs do not include neither quantitative nor qualitative information, that becomes essential to identify the

Figure 3
Traditional network composed of links and nodes. Red dots depict doors and entrances, while green dots represent vertical connections as lifts and stairs. Hospital Universitario La Paz, Madrid, Spain.

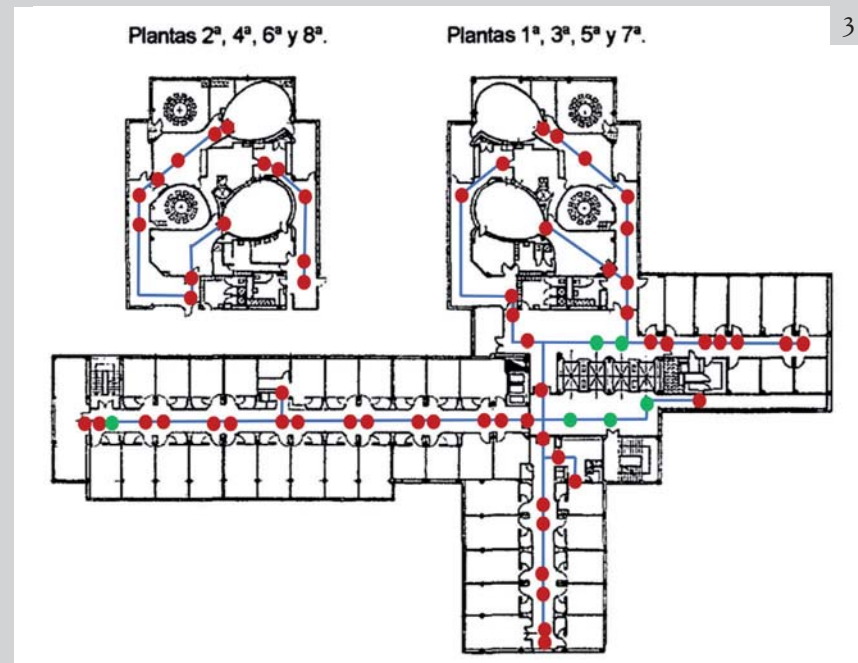


Figure 2
Mapa de ejes. Hospital Universitario La Paz, Madrid, España.

Figure 3
Malla tradicional compuesta por relaciones y nodos. Los puntos rojos representan las puertas y los accesos, mientras los verdes representan las conexiones verticales como ascensores y escaleras. Hospital Universitario La Paz, Madrid, España.

Metodología

El análisis de los espacios y los recorridos interiores y exteriores aborda dos cuestiones principales: por una parte es necesario conocer las relaciones topológicas existentes entre locales y la red de líneas que representan los recorridos posibles. Por otra parte, es esencial considerar las cualidades asociadas a estos recorridos, así como otros aspectos relacionados con el bienestar de los usuarios, con el fin de obtener una información de conjunto útil para ser aplicada en el proyecto de arquitectura.

La metodología que proponemos se basa, pues, en la comparación entre la sintaxis espacial 2D y el modelado 3D, y sus respectivas capacidades para su aplicación en los diseños arquitectónicos complejos.

Los recorridos de los usuarios se describen generalmente de manera abstracta por medio de sus propiedades topológicas, lo que permite centrarse en las relaciones estructurales entre Unidades asistenciales, mientras se eluden los detalles de aquéllos. Por ejemplo, los recorridos públicos dentro de un hospital pueden describirse mediante una malla de líneas que no tienen en cuenta detalles como las dimensiones o la morfología, el número de usuarios o la velocidad del movimiento (fig. 1). La configuración gráfica de este tipo de red se define como un grafo o diagrama, que es un modo de representar una red mediante un conjunto de bordes que conectan pares de vértices.

Análogamente, los espacios y los Sistemas o Unidades en el interior de un hospital se representan en el método de la sintaxis espacial como un conjunto de unidades discretas interconectadas, a pesar de tratarse de un único espacio continuo. Se aplica entonces el concepto de partición convexa de espacios, lo que supone considerar la estructura espacial considerada y sus subdivisiones como un conjunto de espacios convexos – mapa de ejes – que son “los menores y los más grandes” (Hillier and Hanson 1984, pp. 97–98).

El procedimiento para generar los mapas convexos es iterativo. Comienza con la identificación de los espacios convexos más grandes para después ir identificando gradualmente los de menores dimensiones hasta que la totalidad de la superficie se ha subdividido en

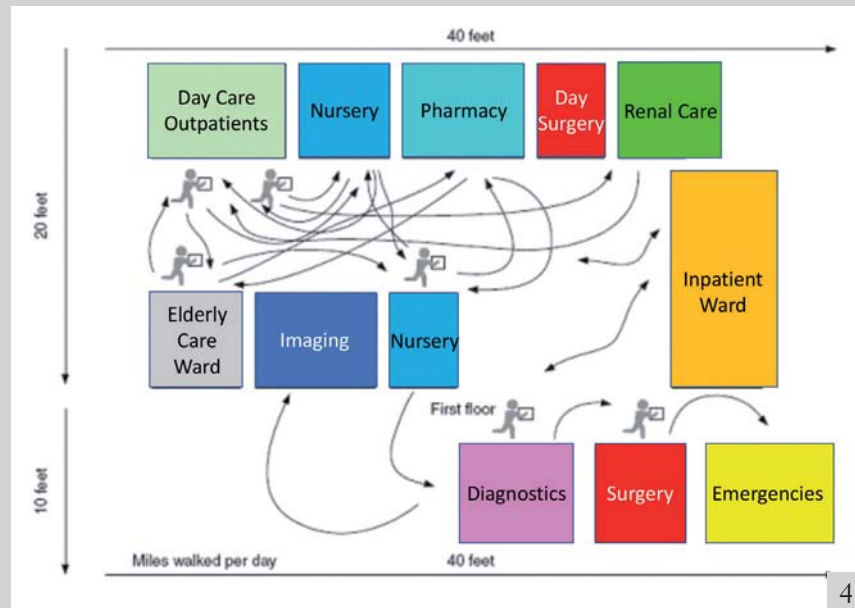
un conjunto de espacios convexos. El mapa axial se dibuja a continuación sobre el mapa convexo trazando los segmentos de mayor longitud que atraviesan estos espacios convexos (fig. 2). Implica un método diferente respecto al tradicional usado en la representación de una red de calles, que utiliza las líneas centrales y las intersecciones correspondientes. En un grafo, la sintaxis espacial representa cada línea por un nodo y cada intersección como un borde, mientras en el método tradicional se hace lo contrario.

Todas estas descripciones se hacían habitualmente por medio de representaciones planas, fácilmente comprobables y analizables. Pero las dificultades que entraña el análisis espacial tridimensional se basan en las limitaciones inherentes a los modelos 3D, ya que se desarrollaron con el objetivo principal de servir como herramientas de visualización de edificios o ciudades, y favoreciendo la apariencia de realidad. Como consecuencia, estos modelos suelen carecer de las estructuras topológicas necesarias para el análisis espacial o para hacer consultas a las bases de datos, ya que sus elementos no están estructurados en unidades espaciales y tampoco están definidas las relaciones que existen entre ellos.

Una primera solución consiste en construir un modelo 2D y asociarle las correspondientes bases de datos tridimensionales. En este caso los espacios interiores se configuran como polígonos que representan pasillos, salas y todo tipo de espacios, mientras sus relaciones se definen claramente a través de un SIG 2D. Para aplicar este método a un edificio tridimensional, hay que definir un modelo de datos que represente tanto los locales como los recorridos utilizando un modelo en red compuesto de vínculos y de nodos en el que los últimos representan las puertas y las entradas. Obviamente, las salidas de emergencia tienen prioridad sobre otras. Los vínculos axiales conectan los distintos nodos a lo largo de las líneas centrales de los vestíbulos y de los pasillos, y la resistencia al flujo – impedancia – se puede categorizar de acuerdo con los diferentes valores de intensidad. La tercera dimensión se representa mediante los vínculos de las escaleras y los elevadores (fig. 3). Los SIG admiten muchas posibilidades de análisis

problems that can appear when walking along a particular itinerary. For this purpose, the main empirical method is based on formal, semi-structured interviews with supplementary document analysis, on informal meetings and discussions, on observations, and subsequent feed-back on reports. According to them, some outputs as *spaghetti* diagrams can be produced to track the inner flows and to identify users' itineraries, among other (fig. 4). Building Information Models (BIM) are designed with the aim to fill this gap. They also extend the traditional technical drawings beyond the 3D, through augmenting the three primary spatial dimensions with time as the fourth dimension (4D). BIM refers then to «a family of technologies and related practices used to represent and manage the information used for, and created by, the process of designing, constructing and operating buildings» (Davies and Harty 2011, p. 235). Consequently, this method implies the construction of a 3D digital model, and to implement the Building Information Modelling in order to capture all information about the architectural project and its infrastructures in a single central data repository. Aspects of BIM such as the computer-aided design and 3D representations, along with various forms of electronic communication, are currently well established technologies (Whyte 2002; fig. 5).

BIM methodology involves representing a design as a combination of “objects” – generic or product-specific, solid shapes or void-space oriented, etc. – and carrying their geometry, but also their relations and attributes. Void-spaces in particular can depict a room's shape, for instance. As objects are defined as parameters and with relation to other objects, when a related object changes, dependent ones are automatically amended. Evidently BIM dovetails easily with standardised floor layout and technical solutions, as well as with elements and repeatable room design. But BIM technology covers more than just geometry, as it must also manage «the complex relationships between the social and the technical resources that represent the complexity, collaboration and interrelationships of organisation and environment», which deals direct-



ly with users welfare and good practices in a hospital (Jernigan 2007, p. 23). Accordingly, attributes can be selected and ordered focusing on the specific analysis purposes. But due to the fact that BIM is a building information system, among its most important weaknesses

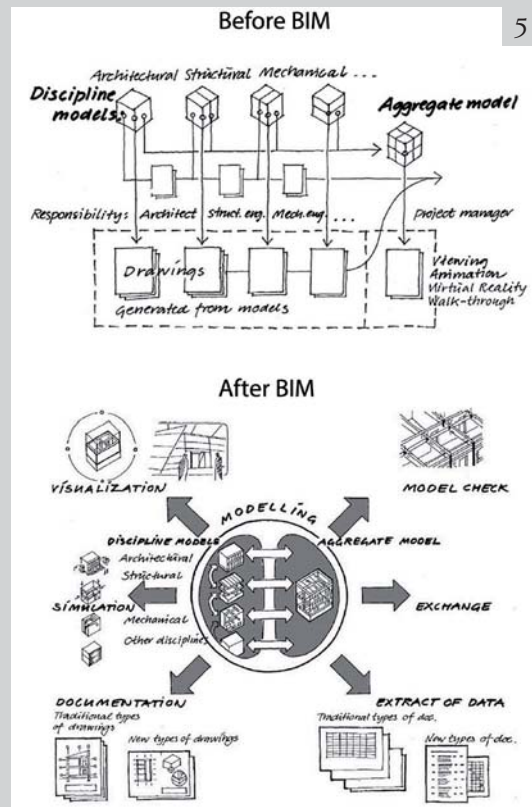


Figure 4 Spaghetti diagram showing the main itineraries of the clinical staff inside a hospital.

Figure 5 Workflow in a hospital's design before BIM and after BIM. VAN BERLO, L., undated. *BIM myths. Five surprising things you did not know about BIM*. Available by: http://www.euhpn.eu/images/downloads/BIM/LeonvanBerlo_Streamermisconceptions1.pdf.

Figure 6 Topological concepts applied to constructive solid geometry: the difference wall (solid) and void (solid) produces a wall with an opening (solid).

que pueden abordarse de manera fácil, como por ejemplo las impedancias causadas por giros o transferencias en una misma planta, los recorridos óptimos, o la accesibilidad hacia las salidas desde cada espacio (Ahuja *et al.* 1993). Por otra parte, los grafos no incluyen información cuantitativa ni cualitativa, que resulta esencial para identificar los problemas que pueden aparecer cuando se recorre un itinerario concreto. Con tal fin, el método empírico se basa en entrevistas formales semi-estructuradas con un análisis de la documentación complementaria, en reuniones y debates informales, en observaciones, y en los subsiguientes informes y revisiones. De acuerdo con todo ello se pueden obtener diagramas *spaghetti* para hacer un seguimiento de los flujos interiores y para identificar los movimientos de los usuarios, entre otras utilidades (fig. 4).

Los modelos BIM se han diseñado para salvar estas deficiencias ampliando las técnicas tradicionales de dibujo plano hasta más allá de las tres dimensiones; y lo realizan a base de aumentar las tres dimensiones espaciales primarias introduciendo el tiempo como cuarta dimensión. BIM es “una familia de tecnologías y sus prácticas asociadas para representar y gestionar la información utilizada y creada para el proceso de diseño, construcción y funcionamiento de los edificios” (Davies and Harty 2011, p. 235). En consecuencia, este método implica la construcción de un modelo digital 3D e implementar el BIM para integrar toda la información relevante para el proyecto arquitectónico y sus infraestructuras en un único repositorio central de datos. Aspectos del BIM como el dibujo asistido por ordenador y las re-

presentaciones 3D, junto a diferentes modos de comunicación electrónica, son tecnologías actualmente asentadas (Whyte 2002; fig. 5). BIM representa un diseño como una combinación de objetos – genéricos o productos específicos, formas sólidas o contornos vacíos, etc. – y maneja su geometría del mismo modo que sus relaciones y atributos. Por ejemplo, los contornos vacíos pueden describir la forma de una habitación, pero como los objetos se definen mediante parámetros y en relación con otros objetos, cuando uno de ellos cambia todos los interrelacionados cambian a su vez. Evidentemente los BIM encajan fácilmente con los diseños realizados a base de estructuras y soluciones técnicas estandarizadas, así como con el diseño repetitivo de elementos y espacios.

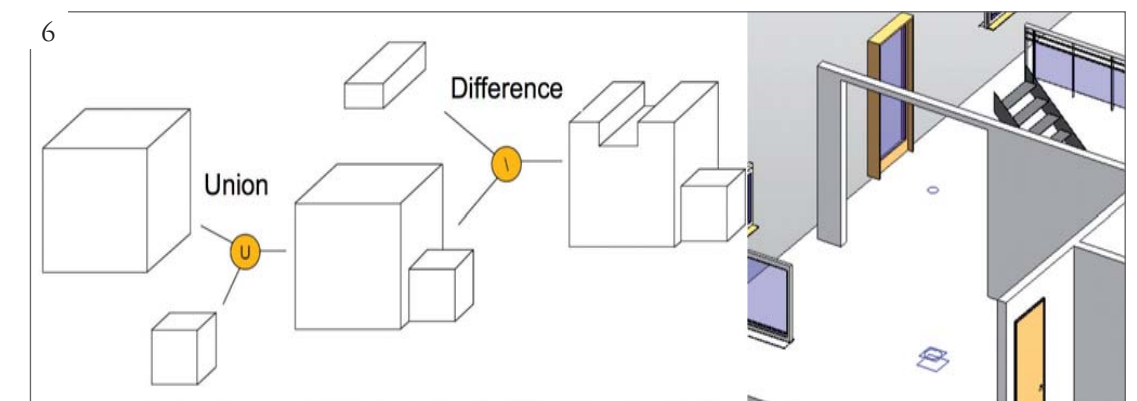
Por otra parte, la tecnología BIM es capaz de manejar series de datos que van más allá de los puramente geométricos, pues puede gestionar «las relaciones complejas existentes entre los recursos sociales y técnicos que representan la complejidad, la colaboración y las interrelaciones de la organización y del entorno», que afectan directamente al bienestar de los usuarios y a las buenas prácticas en un hospital (Jernigan 2007, p. 23). En consecuencia, los atributos se pueden seleccionar y ordenar de acuerdo con unos objetivos de análisis específicos. Pero puesto que el BIM es realmente un sistema de información del edificio, entre sus más destacadas debilidades se encuentran la obtención de datos fiables y precisos, así como la consistencia de las bases de datos asociadas (Chías 1997; Chías 2002).

Como cada edificio establece un espacio topológico en el sentido matemático, cada BIM

Figura 4 Diagrama tipo *spaghetti* mostrando los principales recorridos del personal clínico en el interior de un hospital.

Figura 5 Flujos en el diseño de un hospital antes y después de implementar un BIM. VAN BERLO, L., sin fecha. *BIM myths. Five surprising things you did not know about BIM*. Disponible en: http://www.euhpn.eu/images/downloads/BIM/LeonvanBerlo_Streamermisconceptions1.pdf.

Figura 6 Los conceptos de la topología aplicados a la geometría de sólidos: la sustracción de un vacío (sólido) de un muro (sólido), produce un muro con un vano (sólido).



are data collection and accuracy, as well as the consistency of the implemented databases (Chías 1997; Chías 2002).

As each building sets up a topological space in the mathematical sense, every BIM must store topological information. Topological concepts can be also specified for the case of the three dimensional Euclidean space into which each hospital building is embedded (Paul 2010; fig. 6).

Topological relations might be calculated from geometric information as a query on the BIM. Otherwise, the topological relations must be stored explicitly in the model. In the first instance, there are some recent query languages for specifying the desired information in a concise, well-defined manner. But one of their main limitations is the inadequate treatment of geometric information. This is a significant drawback because buildings are complex spatial objects, and qualitative spatial relationships play an essential role in the analysis of building models. The lack of spatial functionality in BIM query languages is filled by means of the Query Language for Building Information Models (QL4BIM), which provides metric, directional and topological operators for defining filter expressions with qualitative spatial semantics (Daum and Borrmann 2014). In the second case, as topological relations are explicitly stored in the model, topology can be considered of a single component, of several components, and as space partitioning. Topology of a single component manages the redundancy of nodes – the same “real world vertex/point” is stored in several polygons –, the redundancy of edges/loops – the same “real world edge/line” is stored in several polygons –, and redundancy of faces – the same “real world face” is stored in several solids (fig. 7).

Among its utilities, the 3D model can be used to demonstrate room layouts and components, to help users and stakeholders understand designs, and to show rooms and spaces in relation to the rest of the building. With the introduction of time as the fourth dimension, the concerned groups can also simulate a walk through the building, and they can see how the areas will work and the way they will interact with others. In this case, the use of 3D

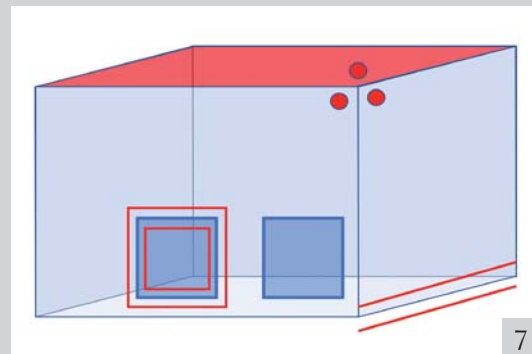


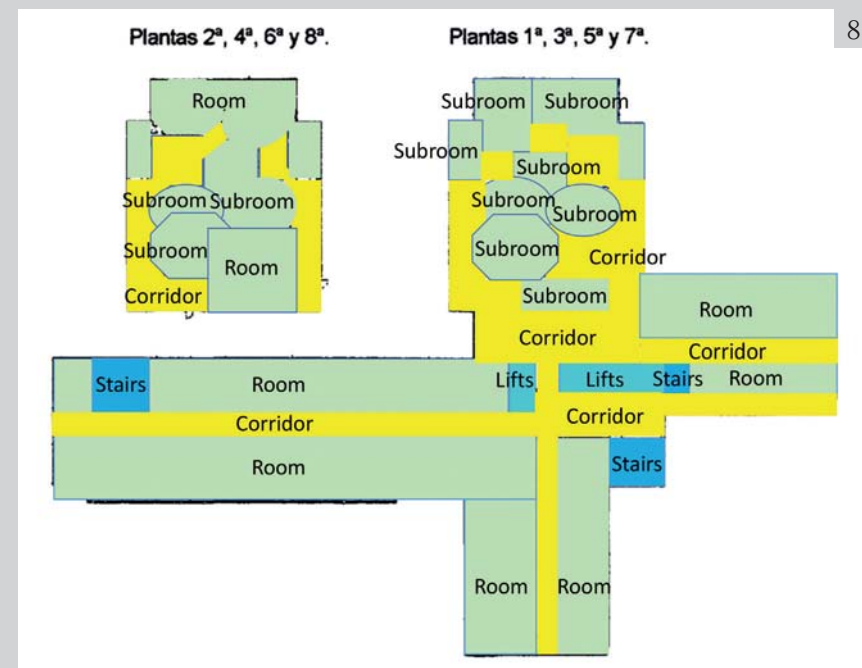
Figure 7
Topology and redundancy of a single component as stored in the model.

Figure 8
Building layout footprint and functional subdivision. Hospital Universitario La Paz, Madrid, Spain.

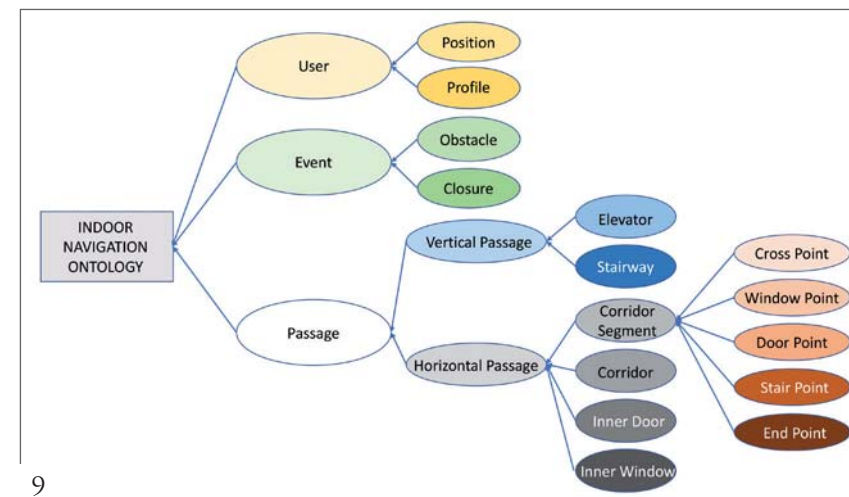
Figure 9
The Indoor Navigation Ontology.

digital indoor databases is fundamental for 3D indoor navigation, and for this specific purpose some particular information is needed: the building footprint of each floor layout within BIM, and the navigation-oriented semantic information (Yuan and Zizhang 2008; Tang *et al.* 2015). Based on the Node-Relation structure, the topological properties within the whole hospital can be defined by means of the semantic model.

On the other hand, the inner structure of a hospital appears to be particularly complex, as there are many rooms and sub-rooms inside each Clinical Unit. From a functional point of view, in order to facilitate the construction of the graph structure, the first step is the subdivision of the footprint of each floor. Rooms can be virtually linked with the corridors by



8



9

ha de almacenar la información topológica. Los conceptos topológicos pueden también especificarse para el caso de los espacios Euclídeos tridimensionales en los que cada edificio hospitalario está integrado (Paul 2010; fig. 6).

Las relaciones topológicas se pueden calcular a partir de la información geométrica como una consulta al BIM; en caso contrario, han de almacenarse de forma explícita en el modelo. En el primer caso, se han desarrollado recientemente lenguajes para efectuar consultas que especifican la información deseada de manera concisa y claramente definida. Pero una de sus mayores limitaciones es el tratamiento inadecuado de la información geométrica. Esto supone una debilidad importante, puesto que los edificios son objetos espaciales complejos, y las relaciones espaciales cualitativas juegan un papel esencial en el análisis de los modelos. La ausencia de la funcionalidad espacial en los lenguajes de consultas a BIM se ha evitado por medio del Query Language for Building Information Models (QL4BIM), que proporciona operadores métricos, direccionales y topológicos para definir las expresiones filtro utilizando la semántica espacial cualitativa (Daum and Borrmann 2014).

En el segundo caso del almacenamiento explícito en el modelo, la topología se puede considerar por elementos únicos, como diversos componentes, o como una partición espacial. La topología de un elemento único gestiona: la redundancia de nodos – el mismo “vértice en el mundo real” se almacena en va-

Figura 7
Topología y redundancia de elementos individuales tal y como se almacenan en el modelo.

Figura 8
Ocupación o huella de cada planta de hospitalización, y subdivisión funcional. Hospital Universitario La Paz, Madrid, España.

Figura 9
Ontología de la navegación interior por el hospital.

rios polígonos –, la redundancia de lados/anillos – el mismo “borde/línea del mundo real” se almacena en varios polígonos –, y la redundancia de caras – la misma “cara en el mundo real” se almacena en varios sólidos (fig. 7).

Entre sus aplicaciones, el modelo 3D se puede usar para mostrar la disposición de las capas y componentes de las plantas, para ayudar a los usuarios e inversores a entender los dibujos, y para comprender las relaciones existentes entre una serie de locales y espacios respecto al resto del edificio. Además, la consecuencia de la introducción del factor tiempo como cuarta dimensión, es que los grupos interesados pueden realizar un paseo a través del edificio, y comprobar como van a funcionar las diferentes zonas y cómo van a interactuar con otras. En este caso, el uso de bases de datos digitales 3D de los interiores es esencial para la navegación y se requiere cierta información concreta: la superficie ocupada por cada planta en el BIM, y la información semántica orientada a la navegación (Yuan and Zizhang 2008; Tang *et al.* 2015). Sobre la base de la estructura Nodo-Relación, las propiedades topológicas en el interior de todo el hospital se pueden definir por medio del modelo semántico.

Por otra parte, la estructura interna de un hospital resulta especialmente compleja, pues existen numerosas salas y sub-salas dentro de cada Unidad Clínica. Desde un punto de vista funcional, para facilitar la construcción del grafo el primer paso consiste en subdividir la superficie en planta de cada piso. Las salas se asocian virtualmente a los pasillos por medio de puertas o ventanas. Las sub-salas sólo se asocian a los pasillos a través de las salas. Escaleras y ascensores son espacios singulares que se identifican como vínculos verticales en cada nivel. Por último, las escaleras también se pueden asociar virtualmente a los pasillos mediante los accesos y las salidas (fig. 8).

Es evidente que la información semántica en un modelo BIM puede ser abundante, pero está principalmente enfocada al diseño arquitectónico y a la planificación de la construcción, lo que simplifica el proceso. Si consideramos los requisitos particulares de la navegación interior en relación a la funcionalidad y al tipo de usuario – ontología de la navegación inte-

means of doors or windows. Sub-rooms can be linked to corridors only through rooms. Stairs and lifts are singular spaces, that are identified as vertical links at each level. Finally, stairs can be also virtually linked to corridors via accesses and exits (fig. 8).

It seems evident that semantic information within a BIM model can be abundant, but it is mainly focused on architectural design and construction planning, what implies a simplification of the process. If we consider the specific requirements for indoor navigation related to functionality and the kind of user – Indoor Navigation Ontology – the organisation of each floor layout can be represented by the corresponding graph and defined by means of the topological properties of rooms and connections, and other produced documents as surveys, etc., that will be linked to each edge or node of the graph (Evans and Minieka 1992; fig. 9). According to functional differences in a corridor stretch, we can define five types of nodes: CrossPoint, WindowPoint, DoorPoint, StairPoint and EndPoint.

In this sense, the users' profile is relevant in topological network construction because different users have specific physical and perceptual capabilities. A physically impaired user can only move from one level to another by taking the lifts, what is impossible in emergency situations. Users' location can be also tracked by means of the network analysis. In this case, the concept of event denotes every obstacle to the users' flow. It can be a physical object that blocks a corridor – particularly in emergency situations, as when a wall that collapses – but also a closed door with special requirements to be opened, or just a lift out of order.

By means of all these tools, groups of interest will also get a better feel for the spaces, itineraries, and access points, and will visualise proposals and make comments during the meetings and discussions with the architects, leading to quicker decision-making. Thus, BIM becomes a useful tool to prevent clashes, to coordinate structural zones, service areas and the architectural envelope, to define surface finishes, and to ensure that maintenance spaces are built according to the technical and normative requirements. Finally, BIM can be

used by the entire supply chain throughout build, and by managers after handover, what adds significant efficiency and value to the architectural project.

Discussion and conclusions

The increasing complexity of hospital design needs a deep exploration of feasible ways for building the connectivity relationships among spatial features. Traditional topology approaches for indoor spaces were previously based on 2D maps or pure geometrical models, which proved to be inadequate to manage other essential related information. The trouble caused by existing topology construction approaches can be prevented by using 3D models which contain detailed semantic and geometric information.

Space syntax and BIM become useful tools to be applied to every architectural project with a high level of complexity, of which hospital and healthcare facilities design is just an example. Both methods support the essential involvement of hospital's users – although attaching different weight and priority – as their specific applications to the architectural project cover different fields, and can be introduced in different phases. The outcomes of interest during the whole process are the *interim criteria* and subjective assessments that can be used to make decisions.

Another conclusion to be stressed is that 2D space syntax method is cheaper and faster, because the associated information is limited. It can be applied to practical situations such as building layout project and disaster prevention. In turn, 3D models are easiest to understand due to their visualisation capabilities, making able to the clinical staff to literally walk around the facilities. But they are also more sophisticated systems and become more rigid if they have to be modified. As they must be applied since the first phases of design, they become also less versatile, and their implementation is more expensive. In turn, an early implementation can be maintained until the end of the service life of the healthcare facility. Moreover data from BIM can support complete interoperability, by communicating and sharing building information based on openBIM.

rior – la organización de cada planta se puede representar mediante el grafo correspondiente y definirse por medio de las propiedades topológicas de salas y conexiones, así como de otros documentos obtenidos, entrevistas, etc., que se asociarán a cada borde o nodo del grafo (Evans and Minieka 1992; fig. 9). De acuerdo con las diferencias funcionales en un tramo de pasillo se pueden definir cinco tipos de nodos: *CrossPoint*, *WindowPoint*, *DoorPoint*, *StairPoint* and *EndPoint*.

En este sentido, el perfil del usuario es relevante en una malla topológica porque distintos usuarios tienen capacidades físicas y perceptivas diferentes. Un usuario físicamente discapacitado sólo podrá trasladarse de un nivel a otro por medio de los ascensores, lo que resulta inviable en situaciones de emergencia. También se puede seguir la ubicación de los usuarios por medio del análisis de redes. En este caso, el concepto de evento denota cada obstáculo en el flujo de los usuarios, que puede ser un objeto físico que bloquea un pasillo – especialmente en situaciones de emergencia, cuando una pared puede colapsar – pero también una puerta cerrada que tenga unos requisitos especiales para ser abierta, o incluso un ascensor fuera de servicio.

Con estas herramientas los grupos implicados en la construcción del hospital obtendrán una mejor aproximación a los espacios, recorridos y puntos de acceso, pero también podrán visualizar y comparar propuestas diferentes y hacer comentarios durante las reuniones y debates con los arquitectos, lo que redundará en una toma de decisiones más rápida. BIM resulta, por tanto, una herramienta muy útil para prevenir conflictos y para coordinar las zonas estructurales, las áreas de servicio y la envolvente arquitectónica; permite definir los acabados y asegurar que los espacios de mantenimiento están contruidos de acuerdo a los requisitos técnicos y de la normativa. Por último, la tecnología BIM puede ser utilizada por la cadena de suministros completa y a lo largo de toda la construcción, pero también por los gestores después de la puesta en funcionamiento del edificio, lo que añade una eficacia y un valor significativos al proyecto arquitectónico.

Discusión y conclusiones

La creciente complejidad que está asumiendo el diseño de un hospital requiere de una profunda exploración de los medios disponibles para construir virtualmente las conexiones entre los elementos espaciales. Las aproximaciones de la topología tradicional aplicadas a los espacios interiores se basan anteriormente en planos bidimensionales o en modelos estrictamente geométricos, que han resultado ser inadecuados para manejar otra información esencial. Este problema se puede salvar utilizando modelos tridimensionales que contengan una detallada información semántica y geométrica. La sintaxis espacial y BIM, resultan ser instrumentos de gran utilidad que se pueden aplicar a cualquier proyecto arquitectónico que tenga un elevado nivel de complejidad, como sucede con los hospitales. Ambos métodos admiten la participación de los usuarios, esencial en estos casos, aunque con diferente peso y prioridad; pero su aplicación concreta al proyecto de arquitectura es capaz de abordar múltiples aspectos y se puede introducir en diferentes etapas. Los resultados de interés obtenidos a lo largo de todo el proceso constituyen los *interim criteria* y las valoraciones subjetivas que se pueden utilizar en la toma de decisiones.

Otra conclusión confirma que el método de la sintaxis espacial bidimensional es más rápido y barato porque la información asociada es limitada. Se puede aplicar a situaciones prácticas tales como el diseño de los planos del edificio o la prevención de riesgos. En cambio, los modelos 3D son más fáciles de entender gracias a su capacidad de visualización, que hace posible que los empleados clínicos deambulen literalmente por el edificio. Pero también son sistemas más sofisticados y rígidos a la hora de abordar modificaciones. Como se aplican desde las primeras fases del proyecto, resultan menos versátiles y su implementación es más cara. A cambio, su implementación temprana en el proyecto puede mantenerse hasta el final de la vida útil del edificio.

Por otra parte, los datos asociados al BIM pueden soportar una interoperabilidad total si se comparte y comunica la información del edificio a través de un BIM de código abierto. Y una vez se ha definido el modelo, se pueden

And once the model is established, many sub-processes and items in the construction process can be simulated: workforce requirements, logistics and materials planning, lay-down areas, installation of self-contained pods such as bathrooms, etc. This can result in programme time savings of typically between two and

ten weeks. BIM also facilitates cost efficiency facility management through the life-cycle of the building, and can carry through and document a showcase for other hospital projects and experiences. As a consequence, BIM strategy is becoming a standard practice in hospital design for some time now.

Bibliografía / References

- AHUJA, R.K., MAGNANTI, T.L. and ORLIN, J.B., 1993. *Network flows: Theory, Algorithms, and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, pp. 846.
- CHÍAS, P., 1997. *Los sistemas de información geográfica (I): Introducción y conceptos generales*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Publicaciones de la Escuela de Arquitectura, pp. 114.
- CHÍAS, P., 2002. *Aplicación de los sistemas de información geográfica a la redacción de planeamiento considerando las capacidades ambientales del territorio*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Publicaciones de la Escuela de Arquitectura, Cuadernos de Investigación Urbanística, pp. 95.
- D'AMORE, B., 2014. Lucio Saffaro, le forme del pensiero. In D'AMORE, B. and SBARAGLI, S. (eds), *Parliamo tanto e spesso di didattica della matematica*. Atti del Convegno Nazionale Incontri con la Matematica, n. 28, Castel San Pietro Terme (Bo), 7–9 novembre 2014. Bologna: Pitagora, pp. 193–200.
- DAUM, S. and BORRMANN, A., 2014. Processing of Topological BIM Queries using Boundary Representation Based Methods. *Advanced Engineering Informatics*, 28, 2014, pp. 272–286.
- DAVIES, R. and HARTY, C., 2011. Building Information Modelling as Innovation Journey: BIM Experiences on a Major UK Healthcare Infrastructure Project. In HAUGBOLLE, K. et al. *6th Nordic Conference on Construction Economics and Organisation – Shaping the Construction/Society Nexus*, vol. 2. Copenhagen, Denmark: Danish Society of Engineers Conference Centre, pp. 233–246.
- DEPARTMENT OF HEALTH UK, 2014. *General design guidance for healthcare buildings*. Available by: http://www.artsandhealth.ie/wp-content/uploads/2014/04/Health_building_note.pdf.
- EGENHOFER, M.J. and HERRING, J., 1990. A mathematical framework for the definition of topological relationships. *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling*. Zurich, Switzerland: International Geographical Union, pp. 803–813.
- EVANS, J.R. and MINIEKA, E., 1992. *Optimization Algorithms for Networks and Graphs*. New York: Marcel Dekker Inc., pp. 470.
- HILLIER, B., 1996. *Space is the Machine*. Cambridge, Mass.: Cambridge University Press, pp. 368.
- HILLIER, B. and HANSON, J., 1984. *The Social Logic of Space*. Cambridge, Mass.: Cambridge University Press, pp. 278.
- JERNIGAN, F., 2007. *Big BIM little BIM*. Salisbury, MD: 4Site Press, pp. 328.
- KIM, H., JUN, Ch., CHO, Y., and KIM, G., 2008. Indoor Spatial Analysis using Space Syntax. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part 2, 2008, pp. 1065–1070.
- LEE, J., 2001. *A 3D data model for representing topological relationships between spatial entities in built-environments*.

Acknowledgements

This research project (BIA2016–78893–C3–1–R) is funded by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness, and the EU.

simular numerosos sub-procesos y aspectos de la construcción del edificio: requisitos de mano de obra, planificación de la logística y los materiales, zonas de descarga, instalaciones de módulos de sanitarios, etc. Todo ello redundará en una reducción del tiempo destinado a la programación de entre dos y diez

semanas. BIM también facilita la gestión del hospital a lo largo de toda la vida útil del edificio, y puede utilizarse como una fuente de experiencias de cara a nuevos proyectos hospitalarios. Por todo ello, la estrategia BIM se está convirtiendo en una práctica estándar para el diseño de hospitales.

PhD Dissertation. The Ohio State University. Available by: https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1486399451960626&disposition=inline.

LORENZ, B., OHLBACH, H.J. and STOFFEL, E., 2006. A hybrid spatial model for representing indoor environments. *Web and Wireless Geographical Information Systems*. 6th International Workshop, W2GIS 2006, Hong Kong, China, December 4–5, 2006. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, pp. 102–112.

NUTSOS, M., 2014. Amazing Matrix visions by BIM-technology. In *EuHPN Seminar – Building Information Modelling (BIM) for Healthcare*, Leiden, Netherlands, April 17, 2014. Netherlands: TNO, Streamer (BIM presentations). Available by: <http://www.euhpn.eu/index.php/bim-seminar>.

PANOFSKY, E., 1947. *The life and art of Albrecht Dürer*. Princeton: Princeton University Press, pp. 368.

PAUL, N., 2010. Basic Topological Notions and their Relation to BIM. In UNDERWOOD, J. and ISIKDAG, U. (eds), *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies*. Hershey, PA: IGI Global, pp. 451–472.

PENN, A., HILLIER, B., BANISTER, D., and XU, J., 1998. Configurational modelling of urban movement networks. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 25, 1, 1998, pp. 59–84.

STAMSO, B., 2014. A strategy for use of BIM during the assets life cycle & case study from the New Østfold Hospital. In *EuHPN Seminar – Building Information Modelling (BIM) for Healthcare*, Leiden, Netherlands, April 17, 2014. Netherlands: TNO, Streamer (BIM presentations). Available by: <http://www.euhpn.eu/index.php/bim-seminar>.

TANG, S.J., ZHU, Q., WANG, W.W. and ZFANG, Y.T., 2015. Automatic topology derivation from IFC building model for in-door intelligent navigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-4/W5, 2015. Tokyo, Japan, May 21–22, 2015. Available by: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-4-W5/7/2015/isprsarchives-XL-4-W5-7-2015.pdf>.

VAN BERLO, L., 2014. BIM mythes. Five surprising things you did not know about BIM. In *EuHPN Seminar – Building Information Modelling (BIM) for Healthcare*, Leiden, Netherlands, April 17, 2014. Netherlands: TNO, Streamer (BIM presentations). Available by: <http://www.euhpn.eu/index.php/bim-seminar>.

VAN OOSTEROM, P.J.M., 1993. *Reactive data structures for geographic information systems*. New York: Oxford University Press, pp. 198.

WHYTE, J., 2002. *Virtual Reality and the built environment*. Oxford: Architectural Press, pp. 165.

Agradecimientos
El proyecto de investigación (BIA2016–78893–C3–1–R) está financiado por el Ministerio español de Economía, Industria y Competitividad, y por la Unión Europea.

YUAN, L. and ZIZHANG, H., 2008. 3D Indoor navigation: a Framework of Combining BIM with 3D GIS. In *44th International Society of City and Regional Planners (ISOCARP) Congress*, Dalian, China, September 19–23, 2008. Available by: http://www.isocarp.net/Data/case_studies/1187.pdf.

ZLATANOVA, S., RAHMAN, A.A. and PILOUK, M., 2002. Trends in 3D GIS development. *Journal in Geospatial Engineering*, 4, 2, 2002, pp. 71–80.