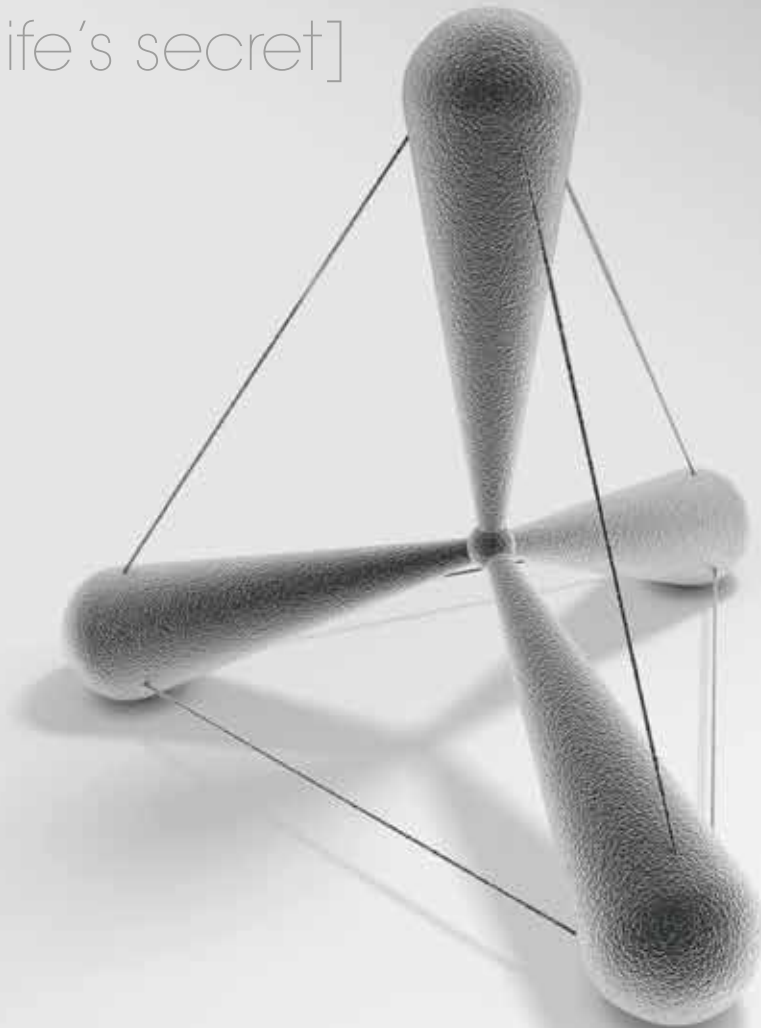


el secreto de la vida

la geometría vital contenida en la geodesia

[the life's secret]



alfonso doncel

“Como de un universo misterioso, desde el abismo oscuro el artista y el científico nos traen lo único, lo extraño, lo inesperado”

Loren Eiseley

antropólogo, escritor científico, ecologista y poeta estadounidense



el secreto de la vida

la geometría vital contenida en la geodesia

alfonso doncel

ISBN 978-84-617-8531-5
DL BA-000053-2017

edita



art, investigation & development

mail: alfonso@doncel.es

Portada y maquetación: luis manuel lópez

Imprime: Maktub Digital

Infografías: luis manuel lópez (LM) y luis fano (LF)

Imágenes: Tecnigraf (TG), alfonso doncel (AD), ángel corbacho (AC), pedro j gómez (PG), pedro casero (PC) y otros

Revisor de los textos: demetrio fernández gonzález

© De lo textos, sus autores

© De las imágenes, sus autores

© De la publicación, su editor

DOME'UP® es una marca registrada por **a+i+d**

The life's secret es una obra escultórica de la que son autores alfonso doncel y luis manuel lópez.

Los textos, fotografías e imágenes integrados en esta publicación (tanto en su versión impresa como digital) están sujetos a los derechos del autor o de los propietarios intelectuales de los diferentes contenidos incluidos, debiéndose observar la prohibición, salvo excepción prevista por la ley, de la reproducción (electrónica, química, mecánica, óptica, de grabación o de fotocopia), distribución, comunicación pública y transformación del total o de cualquier parte de este documento, sin la previa autorización expresa y por escrito de los legítimos titulares de su propiedad intelectual y/o de su edición.

La propiedad intelectual de los textos y/o de cada una de las imágenes y/o creaciones contenidas en este documento pertenece -de forma individual- a sus autores. La edición de la publicación, a la editora a+i+d.

La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual.



Índice

intro	pág. 5
la bioesfera geodésica the life's secret	pág. 9
capítulo I esferas viajeras	pág. 13
capítulo II pensamiento triangular	pág. 43
capítulo III cúpulas y esferas geodésicas	pág. 63
capítulo IV el secreto del carbono	pág. 91
epílogo	pág. 105
bibliografía y enlaces de acceso	pág. 108
agradecimientos	pág. 110



fotografia: PJ



¿De dónde venimos? ¿Quiénes somos? ¿Adónde vamos? (D'où venons nous? Que sommes nous? Où allons nous?) es un cuadro de Paul Gauguin, óleo sobre lienzo de medidas 139,1 cm x 374,6 cm pintado en 1897, durante su segunda estancia en Tahití; se conserva en el Museo de Bellas Artes de Boston / USA

intro

Además del título de la obra de Gauguin, "¿Quiénes somos? ¿De dónde venimos? ¿Adónde vamos?", éstas son algunas de las preguntas que se hace el hombre desde que tomó conciencia de sí mismo. Y lo hace desde alguna de las cuatro fuentes del conocimiento, a saber: la ciencia, la religión (o la revelación), la filosofía y las artes. Insiste porque es un ser racional y quiere saber. Los humanos necesitan –de forma atávica– conocer.

En realidad nos preocupan otras cosas. Nos preocupa sobrevivir, algo tan abstracto como "estar bien" e incluso aspirar a algo tan sublime como sentirnos felices, y para ello nos ocupamos de disponer de medios, de oportunidades y de tiempo; de los seres que queremos o dependen de nosotros; también de ser aceptados por estos y el resto de los congéneres que nos rodean. Algunos incluso pretenden influir sobre las vidas de otros, ejerciendo el poder.

Una vez resueltas estas minucias es cuando el ser humano se ocupa de cuestiones más ambiciosas. Evidentemente se formula muchas más preguntas que las tres iniciales y lo hace –fundamentalmente– para encontrar sentido a la vida: porque necesita respuestas al "¿porqué son así las cosas?" y las razones del devenir, también al "¿cómo?", la razón última de los sucesos.

Pertenezco a esa categoría de seres “preguntones” y la fortuna me ha permitido asistir e insistir en dos de esas fuentes de conocimiento: las artes plásticas, a través de mi desempeño como pintor y escultor, y la ciencia, por mi formación universitaria en química y física. Desde esas disciplinas aparentemente tan distintas me intereso especialmente por el “cómo” y en particular por algo tan abstracto y genérico como pueden ser las razones de las configuraciones espaciales que interesan a los seres vivos.

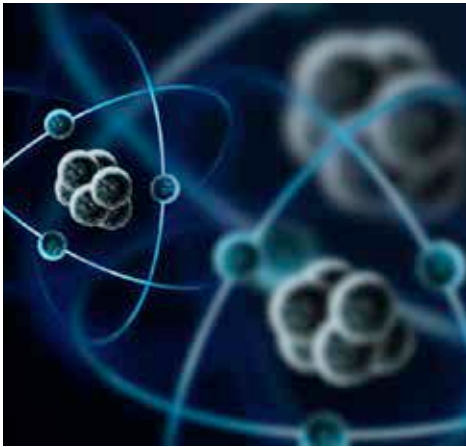
Patrones. El hombre busca patrones, como si pudiera explicar, con una fórmula única e inmutable, las leyes que rigen lo que observa. Diferentes ramas de la ciencia (biología, química, física, matemáticas, filosofía, ingeniería o arquitectura) ofrecen respuestas parciales, mientras que es el compendio de la ciencia el que ensambla la información con la pretensión de ofrecernos una respuesta, siquiera parcial, a esas amplias, complejas y difíciles preguntas, para las que –pueden estar seguros– no tenemos aún respuesta absoluta.

La ciencia ha logrado encontrar algunas reglas generales que dan sentido a lo que vemos a nuestro alrededor y lo ha logrado desafiando a uno de los mayores enemigos imaginables: la intuición de aquello que parece evidente. De hecho parece que los límites de lo posible encuentran su frontera en el conocimiento científico.

Muchos antes que yo se han preguntado si lo vivo observa una determinada configuración espacial común y, si es así, cuál es y por qué es exitosa: si existe una arquitectura vital, siquiera una sintaxis espacial que sirva de base a la vida. Podría citar a muchos: por mencionar solo a algunos autores próximos en el tiempo en el tiempo nombraré a Ernst Haeckel, Ricard Solé o Donald E. Ingber. A principios del siglo XX el zoólogo escocés D’Arcy Thompson, refiriéndose a Galileo –que a su vez citaba a Platón– sugería: “¿Puede que el Gran Libro de la Naturaleza esté escrito en idioma geométrico?”

La cuestión es tremendamente amplia y por tanto precisa una respuesta a su medida. Esta obra aborda someramente esta compleja cuestión, cual es si la vida natural, tal y como la conocemos, observa un patrón espacial y si ese patrón es precisamente el condicionante esencial de su éxito. De las posibles respuestas pretendo la más resumida, esquemática y descriptiva y –de forma utópica– me propongo condensarla en una única imagen: una obra escultórica.

Expreso “vida natural” porque a partir de mediados del siglo XX se desarrolló conocimiento suficiente para generar entes artificiales que emulan (hasta límites antes inconcebibles) a los naturales, hasta el extremo que ahora nos vemos obligados a declarar la distinción entre vida natural y artificial, virtual, etc.; estamos rodeados de robots, de máquinas o entornos creados ex novo por el ser humano que, por un lado, nos facilitan las cosas, pero que por otro amenazan nuestra hegemonía: la invasión es irreversible y, tal y como planteamos nuestro desarrollo tecnológico, ya inevitable. Supongo que no pasará mucho tiempo hasta que se logre dotar a esas creaciones cibernéticas de algo parecido a la conciencia humana, de forma que esa distinción que ahora podemos hacer con cierta facilidad no sea tan sencilla.



Vuelvo a referirme a la vida natural para insistir en la cuestión de la búsqueda de patrones. Como mi trabajo se desarrolla en el universo de los objetos (de ahí el término artes plásticas) y en particular en relación a sus connotaciones formales y estéticas, me planteo si los seres vivos -lo vivo- necesitan cumplir reglas espaciales de forma excluyente para, sencillamente, "ser o no ser".

Una respuesta rápida es que efectivamente existe un patrón excluyente en la composición de la materia viva: sabemos que no existe fuera del carbono. Es decir, que si algo no contiene carbono actualmente no puede considerarse "vivo" en su acepción clásica. Para afianzar esta realidad, en nuestro estudio acuñamos la frase "si quieres saber si está vivo, pregúntale si está hecho de carbono".

Podemos asegurar que el denominador común de la vida es el carbono: no hace falta acotar "vida terráquea", porque es la única que conocemos; nos limitan las condiciones de nuestro planeta, tales como temperatura, presión, nivel de insolación, exposición a una determinada gravedad, etc.; es decir, estamos sometidos a determinadas condiciones -fundamentalmente energéticas- que condicionan un entorno cerrado en el que, según sabemos hasta ahora, el átomo de carbono parece ser el mejor adaptado.

Hablar del carbono como ladrillo exclusivo es hablar de materia y por tanto -de forma inherente- de disposición, de distribución, de espacio y forma, de "locus": de materia concreta que observa una determinada distribución espacial, que existe como hecho objetivo en el espacio y el tiempo.

Efectivamente, como veremos más adelante, es la configuración electrónica del carbono lo que le hace especial: lo que le permite ser como es y comportarse de una determinada manera.

Se preguntarán que tiene que ver todo esto con un artista plástico. La respuesta no es breve, pero sin duda tiene que ver con una de las líneas de trabajo de mi estudio, centrada en la estética del constructivismo y la geometría. Dentro de ese interés geométrico cabe destacar nuestra preferencia por el mallado y la triangulación tridimensional, disciplinas que exploramos con cierta amplitud (de tiempo, medios y esfuerzo, que no de éxitos). Será más adelante, en el capítulo correspondiente, cuando refiera brevemente los conceptos que hemos visitado y los logros -si es que así se pueden denominar- obtenidos. Supondrá el lector que no soy el primero en abordar estos conceptos: en el texto podrán comprobar que soy un mero aprendiz al lado de gigantes como Piero della Francesca o Leonardo da Vinci, por citar a dos muy conocidos, y que son muchos los artistas plásticos o creativos de distintas disciplinas que han trabajado y trabajan con esta base conceptual.

Este texto pretende narrar, a modo de ensayo ligero, el camino recorrido por el estudio a+i+d (es decir, por mí y por quienes han trabajado conmigo) en relación con esa apasionante curiosidad por las formas y su disposición espacial, por la integridad tensional, la geometría triangular y –particularmente– por lo que se ha quedado en denominar “geodesia constructiva”, entendida como la generación de formas curvilíneas a partir de elementos rectos.

Observará el lector que ese camino se cruza –tanto en el relato como en la realidad– con descubrimientos científicos recientes, fascinantes y de elevado impacto, que no hacen sino manifestar el interés de estas materias no solo en la estética actual, sino en la búsqueda de las razones últimas de la materia natural, de lo vivo, tal y como la conocemos en la actualidad.

Recomiendo su lectura sin perder de vista –en ningún momento– que el narrador es un artista plástico: no se dejen embaucar por las palabras y por el ruido de fondo. Aunque al principio pueda parecerlo, este no es un texto de divulgación científica ni una reseña histórica; si acaso se trata de una crónica o cuaderno de bitácora. No trata de comunicar idea alguna que no esté incardinada en la estética, y muy particularmente en la estética conceptual.

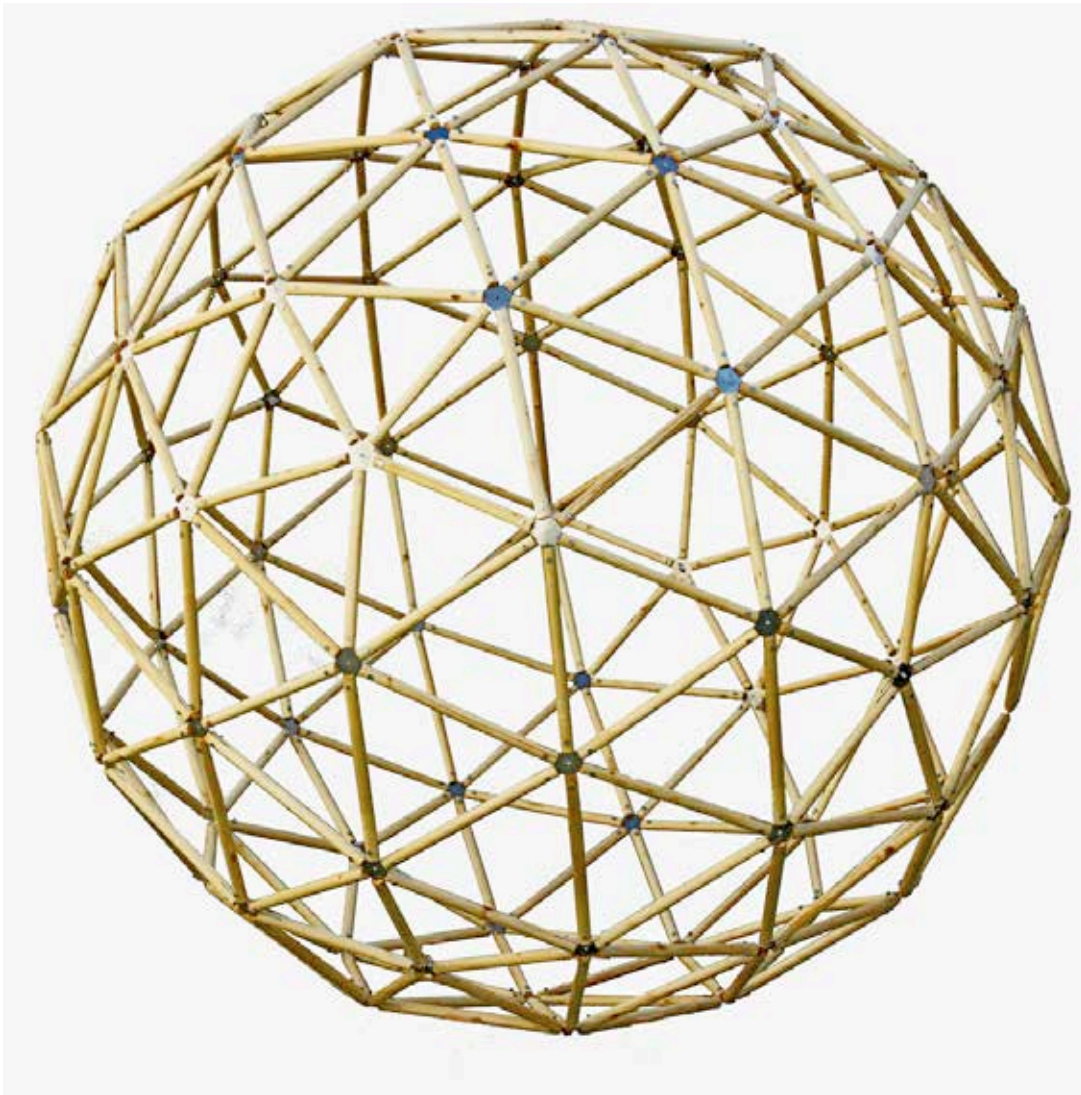
Contiene realidad y es mi pretensión que albergue, a modo de contenedor versátil, un discurso artístico y conceptual, condensado en una secuencia de ideas sobre una determinada obra de arte que hemos titulado “The life’s secret”, de la que tengo muy claro que mi compañero Luis Manuel López y yo, autores de la misma, en realidad no hacemos más que escribir otro capítulo más de esa abstracta búsqueda de las razones –siquiera estéticas– que preocupan a los humanos, y también que de ella no somos los únicos autores, si acaso meros transcritores de una pequeña parte de una corriente de conocimiento.

Creo que en esta obra el resultado formal (sencillamente una esfera geodésica) queda superado por su profunda carga conceptual, plena de significados y mensajes. Y es por ello por lo que entiendo procedente la redacción de este ensayo, intentando transmitir algunas claves para que el mensaje sea perceptible en su totalidad. Soy consciente de que puede parecer pretencioso condensar la respuesta a una cuestión tan amplia en una sola creación escultórica: esa es la razón de ser del arte, y en el seno del arte es donde podemos formular propuestas como las contenidas en este ensayo.

Conviene por tanto que el lector sitúe esta publicación y su contenido en el seno de la estética conceptual, que es, por cierto, una de las más atractivas para el ser humano y, sin duda, una de las puertas de acceso al conocimiento, esa densa nube que no es más que materia natural, porque el hombre es parte de ella y todo lo que genera es, por tanto, naturaleza.

Que es en realidad a lo que nos dedicamos los artistas plásticos.

alfonso doncel



fotografía: (AD & LM)

The life's secret W240

alfonso doncel y luis manuel lópez
madera de abeto, aluminio y acero inoxidable
240 cm de diámetro



fotografía: PJ

la biosfera geodésica the life's secret

La obra escultórica *The life's secret* (El secreto de la vida) pretende una aproximación al apasionante mundo de la geometría y la geodesia. Para sus autores supone a la vez un ejercicio de constructivismo geométrico –como técnica creativa– y de revisión o análisis conceptual de las claves que soportan la vida tal y como la conocemos.

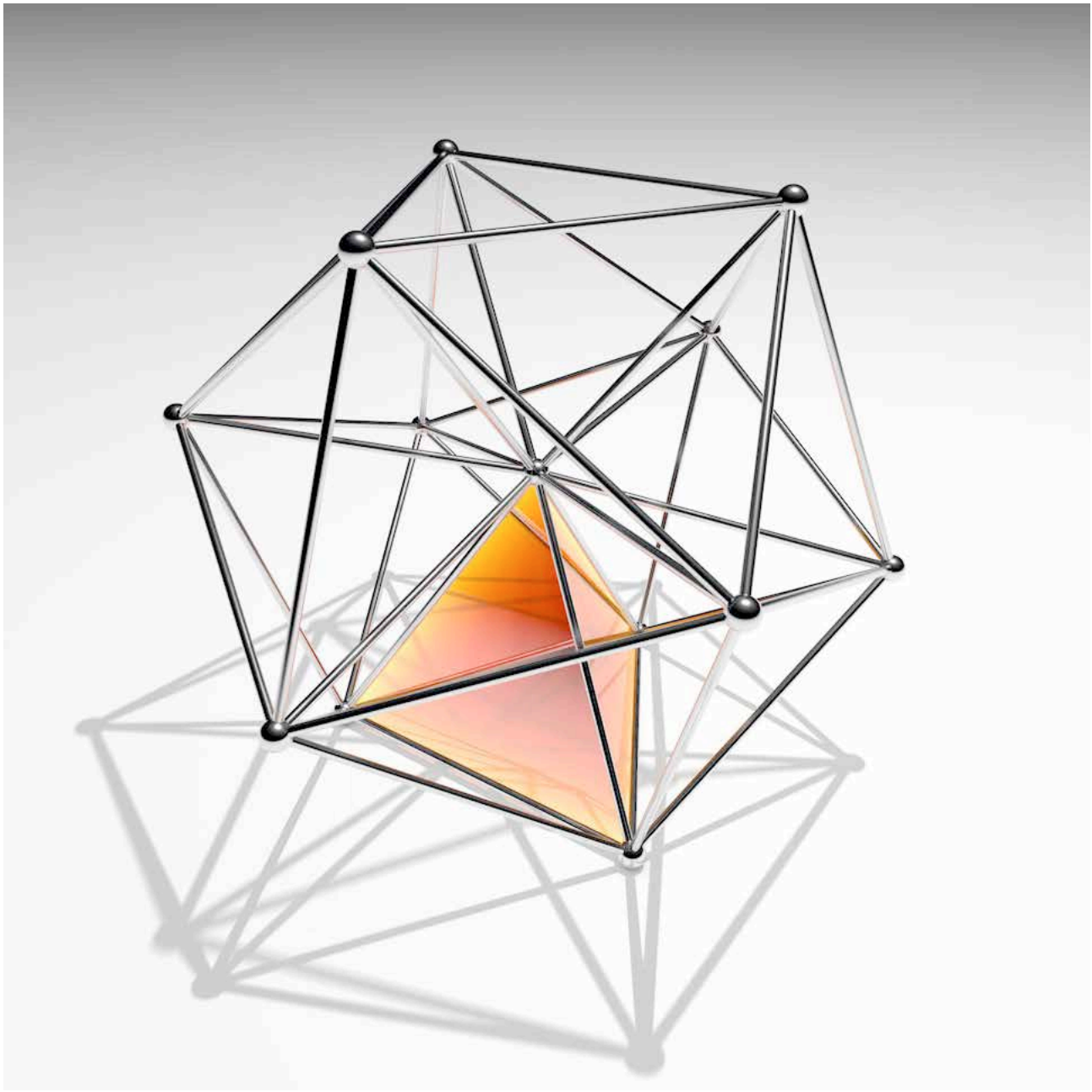
Para diseñarla y construirla hemos partido de las bases constructivas de los sólidos platónicos, de los trabajos de Richard B. Fuller –sobre tensegridad y geodesia– y de los últimos avances en el conocimiento de la moderna química del carbono, generando un entorno de herramientas, ideas y soportes estéticos que nos permitan comunicar un ambicioso concepto como es ensayar sobre el secreto de la geometría de la materia viva. Como otros ejecutores de construcciones geodésicas, antes hemos explorado soluciones eficientes para el problema de las conexiones nodales y testado y elegido materiales adecuados para construirlas, generando diseños eficientes y mecanizando las piezas para lograr un montaje exacto y estable de la pieza final.

Antes del proyecto *The life's secret* –en adelante y para hacerlo más corto, TLS– que ahora presentamos en mi estudio habíamos trabajado con ámbitos conceptuales relacionados, tales como falsos espacios triangulados (*Constelación Cartesiana, Starry Dome*), la comunicación de los hallazgos científicos (*El Anillo de Schödinger*) o la estética de lo vivo (*Simply (a)live*), y habíamos diseñado un amplio programa constructivo desarrollado como una marca industrial (*DOME'UP®*) dedicado a la generación de soluciones constructivas eficientes tanto en el ámbito de las cúpulas geodésicas como en el diseño de piezas tridimensionales de uso en arquitectura efímera (*cUb*, del programa *DOME'UP TECH*).

Este relato refiere los orígenes de nuestro interés por esas materias y hace explícitos algunos antecedentes en el ámbito del constructivismo y el entorno formal en el que los autores basamos la obra TLS. Comienza exponiendo, de forma cronológica inversa, una secuencia de hallazgos y descubrimientos científicos que nos han permitido disponer de los conocimientos suficientes para entender la geometría empleada en la construcción de TLS, que pretendo asimilar a esa simetría de éxito de la vida conocida.

La obra *The life's secret* contiene un mensaje universal y de aplicación a numerosas disciplinas, cual es que el éxito depende de la capacidad de adaptación a diversos entornos, de la disposición de la suficiente flexibilidad formal y/o conductual y de la capacidad para generar y/o obtener interrelación; es decir, de disponer de generosidad para dar y para recibir.

Pretende resumir y mostrar, en una sola pieza de arte en forma de figura geométrica, construida mediante ensamblaje de cientos de piezas, los conocimientos actuales de que disponemos para entender la arquitectura de la vida; también –y simultáneamente– pretende transmitir nuestros deseos, desvelos e inquietudes para construir una bella escultura, en la que el equilibrio, el ritmo y la contundencia de lo mínimo y exacto nos permiten elaborar una creación atemporal, llena de significados y de respuestas a las preguntas que el hombre lleva haciéndose desde tiempos inmemoriales.



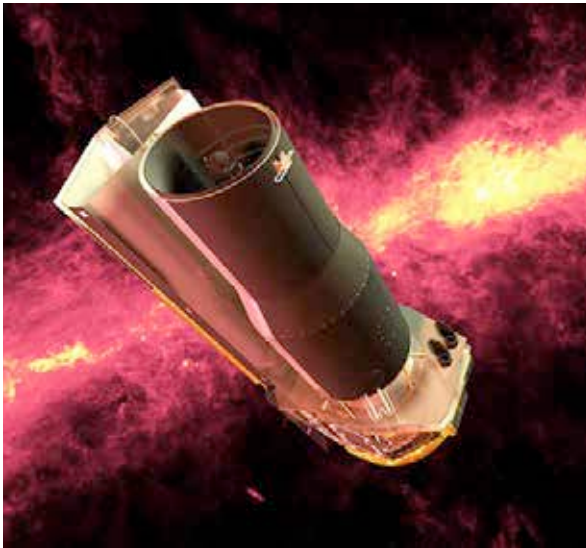
infografia: LM

capítulo I

esferas viajeras

Comienzo con una historia contada al revés; es decir, de lo más actual a lo anterior. Relata cómo se descubrió la existencia de un compuesto (una molécula denominada fullereno) que nos lleva visitando desde hace millones de años procedente del espacio exterior y que –créanme– desconocíamos hasta hace bien poco.

Empezaré explicando que el telescopio espacial Spitzer, conocido inicialmente como Instalación de Telescopio Infrarrojo Espacial (o SIRTf, en inglés), es un observatorio espacial infrarrojo de la NASA lanzado en 2003, con una vida útil estimada de 2,5 años, aunque sigue operando tras ese período hasta que –de forma paulatina– se evapora el helio que usa como refrigerante; he comprobado que, mientras escribo este relato en el año 2017, Spitzer sigue en funcionamiento: así lo declara el JPS de la agencia espacial americana desde su web de California.



A pesar de su muerte anunciada, en julio de 2010 la NASA publicó un asombroso descubrimiento: la visión infrarroja sensible del telescopio Spitzer confirmó la presencia de unos compuestos de carbono denominados fullerenos (léase fulerenos, aunque también se denominan buckyesferas o futbolenos) unas moléculas esféricas recientemente conocidas, formadas exclusivamente por átomos de carbono, en la lejana nebulosa planetaria Tc1.

Parte de ese hallazgo se debe a los astrónomos Aníbal García-Hernández y Arturo Manchado, del Instituto Astrofísico de Canarias, que lideraron el descubrimiento de enormes cantidades de buckyesferas. Estos astrónomos también las encontraron en una nebulosa planetaria de una galaxia cercana llamada Nube Pequeña de Magallanes.

Este sorprendente descubrimiento supuso la primera detección extragaláctica de estas moléculas y fue particularmente excitante para el equipo investigador porque, en contraste con otras nebulosas planetarias galácticas, la distancia a esta galaxia es conocida con exactitud; conociéndola, pudieron calcular su cantidad, que alcanzó el 18 % de la masa de la Tierra o 15 veces la masa de la Luna, lo que supone un buen número de esas pequeñas esferas viajeras en el llamado “polvo cósmico”.

Las implicaciones de este estudio son de gran alcance; los científicos habían especulado en el pasado con la idea de que esas esferas, actuando como jaulas para otras moléculas y átomos, podrían haber traído sustancias hasta la Tierra, impulsando el comienzo de la vida. Las evidencias de esta teoría procedían del hecho de que las esferas fueron encontradas en meteoritos, portando gases extraterrestres.

Efectivamente, en otro equipo investigador, mientras realizaba estudios sobre trazadores de impactos de meteoritos en nuestro planeta, el geólogo del Instituto Scripps (USA) Jeffrey Bada decidió entregarle a una estudiante de post-grado, Luann Becker, una muestra de rocas provenientes del cráter de un meteórico ubicado en Sudbury (Canadá), que le habían enviado años antes para su análisis. Utilizando la técnica de los pioneros en la obtención de fullerenos –la forma cristalizada natural de los fullerenos– Becker encontró esferas en las muestras. Al conocer que otros investigadores habían logrado atrapar átomos dentro del enjaulado atómico que conforma un fullereno, Bada y su equipo especularon que quizás el impacto del meteorito podría haber insertado algunos átomos dentro de los fullerenos.

Cuál no sería su sorpresa cuando, al calentar las muestras con fullerenos hasta que estos se rompieron cual burbujas de jabón expuestas al aire, encontró en la cámara de vacío restos de gas helio en una cantidad y composición isotópica que no correspondía a la de este gas en la atmósfera terrestre en el momento del impacto del meteorito de Sudbury en Canadá; dada la resistencia al impacto de estas duras esferas de carbono, la conclusión lógica es que el helio tuvo que haber quedado atrapado antes de llegar a la Tierra, y el único lugar desde donde puede haber provenido tal concentración de helio es desde el vecindario de una estrella roja en proceso de extinción.

La importancia de este descubrimiento es enorme, porque posibilita que otros elementos hayan viajado por el mismo método, incluyendo moléculas de gas carbónico, elemento esencial para la vida en este planeta, que no existía en grandes cantidades en la Tierra primitiva.

Teníamos, pues, una molécula esférica de carbono que viaja por el espacio y nos permite especular sobre el origen de nuestra vida, que hasta hace muy poco no se conocía en ámbitos extraterrestres. Pero, ¿qué es el fullereno?

buckyballs

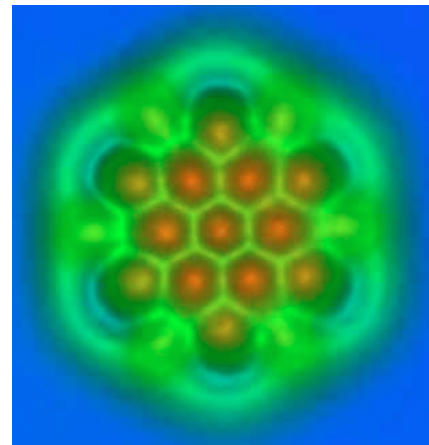
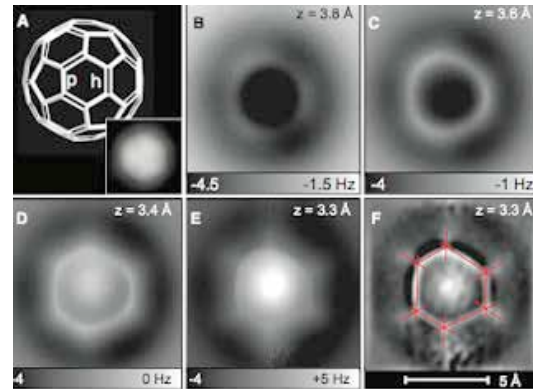
Los fullerenos son un conjunto de nuevas formas alotrópicas del carbono diferentes de las conocidas hasta hace bien poco, como el diamante y el grafito. Su descubrimiento se atribuye, en 1985, al equipo de investigación de R. Curl, H. Kroto y R. Smalley, aunque su existencia ya fue predicha en 1965.

Se trata de moléculas con formas esferoidales que contienen desde 32 hasta 960 átomos de carbono, algunas muy estables, ya que no poseen enlaces libres. El arquetipo de estas moléculas se denomina *buckminsterfullereno*, buckyball o futboleno (por su parecido con un balón de fútbol) y está integrada exclusivamente por 60 átomos de carbono (C_{60}).

El descubrimiento de los fullerenos, sus implicaciones y consecuencias han marcado el devenir de la ciencia en los últimos 30 años. Su impacto en la química del carbono actual, que había sido desarrollada con intensidad en los dos últimos siglos, implica una profunda revisión de lo conocido hasta la fecha y ha acelerado drásticamente el desarrollo de nuevas aplicaciones, presentes y futuras.

Efectivamente, ese año de 1985 sus descubridores cambiaron la química moderna. En el laboratorio del Departamento de Química de la Universidad Rice en Houston, Texas (USA) los químicos Harry Kroto, Rick Smalley, Bob Curl y sus dos estudiantes de post-gradó fueron los primeros seres humanos en descubrir –es decir, en observar y reconocer– una nueva forma de carbono puro en la naturaleza. Hasta entonces solo se conocían otras dos formas naturales estables o alotrópicas del elemento carbono: el diamante, uno de los más duros materiales conocidos, y el grafito, uno de los más quebradizos.

¿Cómo es posible que nunca nadie haya observado antes esta tercera forma de carbono, siendo uno de los elementos más estudiados por el hombre, por tratarse del ladrillo constitutivo de la vida en nuestro planeta?



Esta odisea de descubrimiento y sagacidad comienza cuando dos investigadores ingleses, Harry Kroto y Bob Curl, estudiaban bandas espectroscópicas interestelares, tratando de descubrir el tipo de compuestos que había en el espacio. Encontraron que había compuestos que parecían largas cadenas de carbono, con nitrógeno e hidrógeno en sus extremos.

El descubrimiento les sorprendió, pero como todo ocurría en el espacio lejano no estaban seguros de la interpretación que debían otorgar a sus observaciones. Kroto y Curl conocieron en un congreso a un investigador de Texas, Rick Smalley, que trabajaba con emisión láser y tenía en su poder un equipo tecnológico que permitía evaporar sustancias y formar cúmulos. Cuando se conocieron, a Kroto se le ocurrió que podría utilizar el equipo de Smalley con moléculas de carbono para simular lo que ocurre en el espacio interestelar y con ello comprobar la existencia de los compuestos que creía que estaban en el espacio; poco tiempo después, su compañero Curl convenció a Smalley de colocar carbono en su equipo para hacer el experimento.

En septiembre de 1985, Kroto viajó a Houston para trabajar con Smalley Colocaron en el equipo carbono, hidrógeno y nitrógeno e iniciaron la reacción: observaron que se formaba una estirpe de moléculas que solo contenía carbono, en un número de sesenta átomos. Pensaron que en esas condiciones de reacción tenían que agregar más hidrógeno y nitrógeno para que estos se unieran a las cadenas de carbono. Aumentaron la cantidad de hidrógeno y de nitrógeno, pero solo observaron moléculas de C_{60} , que parecía ser un compuesto de gran estabilidad.

Después de muchos experimentos se convencieron de la existencia del C_{60} , pero aún no sabían cómo se podían acomodar esos sesenta átomos de carbono de tal forma que todos tuvieran los enlaces habituales de ese átomo totalmente conectados y sin extremos libres.

Smalley usaba habitualmente su máquina –diseñada por él mismo– para vaporizar silicio, sometiéndolo a altas temperaturas con rayos láser hasta dislocar sus átomos y convertirlos en un plasma; lograba alcanzar temperaturas superiores a los diez mil grados, por tanto más elevadas que las de la superficie de cualquier estrella. En la cámara de vacío del vaporizador de la Rice University lograban reagrupar los átomos dislocados gracias al ingenioso mecanismo de soplar los racimos con una nube de helio, que al ser inerte no intervenía en la reacción. Consiguieron así una cierta cantidad de esos racimos de átomos agregados, que posteriormente analizaban con un espectrómetro de masa para determinar su estructura.

En esos años, Kroto –químico y astrofísico británico– buscaba una explicación para sus observaciones del carbono estelar, “polvo estelar” como él lo llamaba, anhelando conocer la estructura y/o forma de agregación de ese extraño carbono foráneo mientras buscaba una respuesta a la pregunta ¿de dónde venimos? Se preguntaba cómo llegó hasta nosotros el carbono, el elemento fundamental de la vida en nuestro planeta. Los astrónomos saben desde hace mucho tiempo que la mayoría del carbono de nuestro universo se formó en los núcleos de las estrellas, relativamente poco tiempo después del Big Bang.

La hipótesis manejada se basaba en que este nuevo material (racimos agregados de carbono) viajó por el espacio hasta caer sobre los planetas en formación como verdadero maná vital, de suerte que solo en aquellos en los que las condiciones eran fértiles –energéticamente adecuadas– para la vida carbonífera se consolidó con otros elementos para formar, por evolución, los primeros microorganismos. Como decía Carl Sagan en su popular serie Cosmos “no somos más que polvo de las estrellas”. Pero, ¿cómo y en qué condiciones pudo llegar este elemento hasta la Tierra?

Eso es justamente lo que estudiaba Harry Kroto: usando la espectroscopia de microondas, estudiaba la composición de estrellas ricas en carbono, cuyas atmósferas contienen cadenas alternadas de carbono y nitrógeno y se cuestionaba cómo se formaron estos agregados y de qué forma se mantenían unidos para que pudieran viajar por el espacio interestelar sin destruirse.

Pues bien, una vez realizados los experimentos y con la ayuda de dos estudiantes ayudantes –J. R. Heath y S. C. O’Brien– Kroto analizó los agregados que se encontraban en el plasma de la cámara de vacío, muy similares a los que él había encontrado en sus estudios de plasma estelar.

Como ocurre a menudo en la ciencia, no siempre lo que se busca es lo que se encuentra: los análisis del equipo de Kroto, Curl y Smalley mostraron que existía una regularidad en el espectro de las cadenas de carbono producidos en el plasma: los átomos se asociaban mayoritariamente en grupos de 60 unidades. ¿Por qué 60, por qué ese número y no cualquier otro?

Ellos sabían que no podían quedar átomos con enlaces libres en los bordes de los racimos, porque dejaron de introducir hidrógeno y/o nitrógeno y la situación no variaba: tenían que unirse a algo o entre ellos, de alguna forma hasta ahora desconocida. Y si no había nada más en la cámara al vacío de Smalley, algo inesperado debía ocurrir. Es aquí donde posiblemente asistimos a otro episodio de serendipia o encuentro casual.

En el año 1989, el profesor Royston R. Roberts publicó su libro *Serendipia: descubrimientos accidentales en la ciencia* en el que revisaba la increíble facultad de hacer descubrimientos afortunados o inesperados de forma accidental. El término, acuñado por Horace Walpole, está inspirado en un cuento de hadas sobre “Los tres príncipes de Serendip”, país ubicado en lo que podría ser la isla de Ceylan, actualmente Sri Lanka; sus protagonistas siempre estaban haciendo descubrimientos –por accidente o sagacidad– de cosas que no se habían planteado.

En su libro, Roberts relata un descubrimiento de similar calado al del equipo de Kroto; por cierto, un conocido episodio que ya pertenece a la historia de la ciencia, relativo a cómo se descubrió la estructura del benceno. Fue Michael Faraday quien lo descubrió en 1825, cuando los propietarios de la fábrica de gas para el alumbrado de Londres le requirieron una solución al problema de que durante el invierno –con el frío– el gas perdía su capacidad de producir llama. En esa época, el gas para alumbrado se obtenía de la grasa de animales marinos como las focas y se guardaba en bombonas de hierro.

Faraday, entonces director del laboratorio de la Real Sociedad de Londres, se dio cuenta de que con el frío, el gas se condensaba y se acumulaba en el fondo de las botellas en forma de líquido transparente y aromático. Pero pasaron muchos años antes de que se descubriera su estructura molecular, que además explicaría por qué era diferente a otros hidrocarburos conocidos en esa época.

El químico alemán Friedrich A. Kekulé era experto en estructura molecular de compuestos orgánicos y por aquellos años (hablamos de 1865) estudiaba la estructura de un nuevo compuesto denominado benceno, formado por seis átomos de carbono y seis de hidrógeno. Pero sus características fisicoquímicas eran muy diferentes a compuestos de similar composición, por lo que la "arquitectura molecular" debía ser distinta a la de las cadenas halifáticas más o menos lineales conocidas hasta la fecha.

El profesor Kekulé narró que tuvo varios sueños en los que los átomos de carbono, agrupados en cadenas, se movían de forma serpenteante y que una de esas serpientes se agarraba a su propia cola, dando vueltas velozmente: Kekulé había descubierto – traduciéndolo su sueño– el anillo del benceno, una molécula con una estructura cíclica e inesperada, que provocaría un giro sorprendente en la química de la época.

Volvamos a la situación en la que el equipo de Kroto se preguntaba sobre la estructura de sus agregados de carbono, en una cifra de 60 unidades, para asomarnos a otra nueva serendipia.

Por casualidades de la vida, ambos investigadores – Kroto y Smalley– habían visitado en 1967 la Exposición Mundial de Montreal, donde la gran atracción la constituían las estructuras geodésicas esféricas de un visionario, diseñador y filósofo norteamericano Richard Buckminster Fuller (1895-1983).

Kroto explica que, mientras se devanaban los sesos para comprender la estructura de sus intrigantes grupos C_{60} , les vinieron a la memoria las cúpulas geodésicas de Fuller que habían observado en aquella visita. De la misma manera que Fuller resolvió sus construcciones, los planos hexagonales de grafito habrían de curvarse para cerrar todos los enlaces de los bordes de la estructura de C_{60} . Sin embargo, sabían que solo con hexágonos (como sabemos, formados por seis triángulos equiláteros) no se logra curvar esféricamente –en las dos dimensiones– una lámina plana.

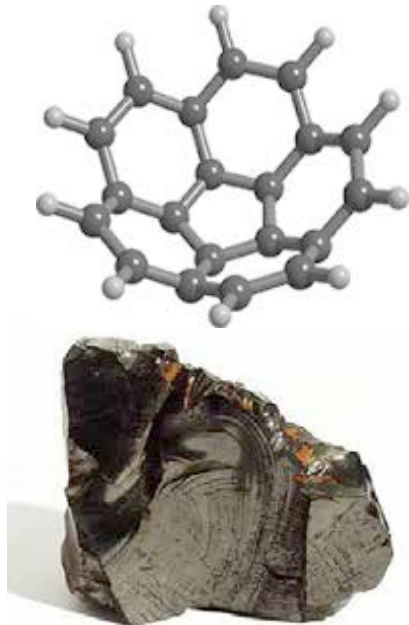


Cúpula de R.B.Fuller. Exposición mundial de Montreal 1967

Fuller había resuelto el problema intercalando pentágonos entre los hexágonos hasta construir una esfera, algo que ya habían hecho antes otros, como el japonés Osawa y el ingeniero alemán Walther Bauersfeld. Esa fue la idea que recordó Smalley una noche mientras jugaba con sus hexágonos de papel tratando de resolver el puzle: recordó que había pentágonos a intervalos regulares entre los hexágonos de las cúpulas geodésicas de Fuller. A la mañana siguiente presentó excitado su inspirada revelación al resto del equipo de Rice.

Efectivamente, contando el número de átomos del C₆₀, se requería de 12 pentágonos regulares, rodeados completamente por 20 hexágonos regulares, para producir una estructura esférica cerrada que satisficiera perfectamente todos los condicionantes de la estructura molecular – geométricos y energéticos– observados.

El descubrimiento de los fullerenos por Harold Kroto, Robert Curl y Richard Smalley les valió la concesión del Premio Nobel de Química en 1996.



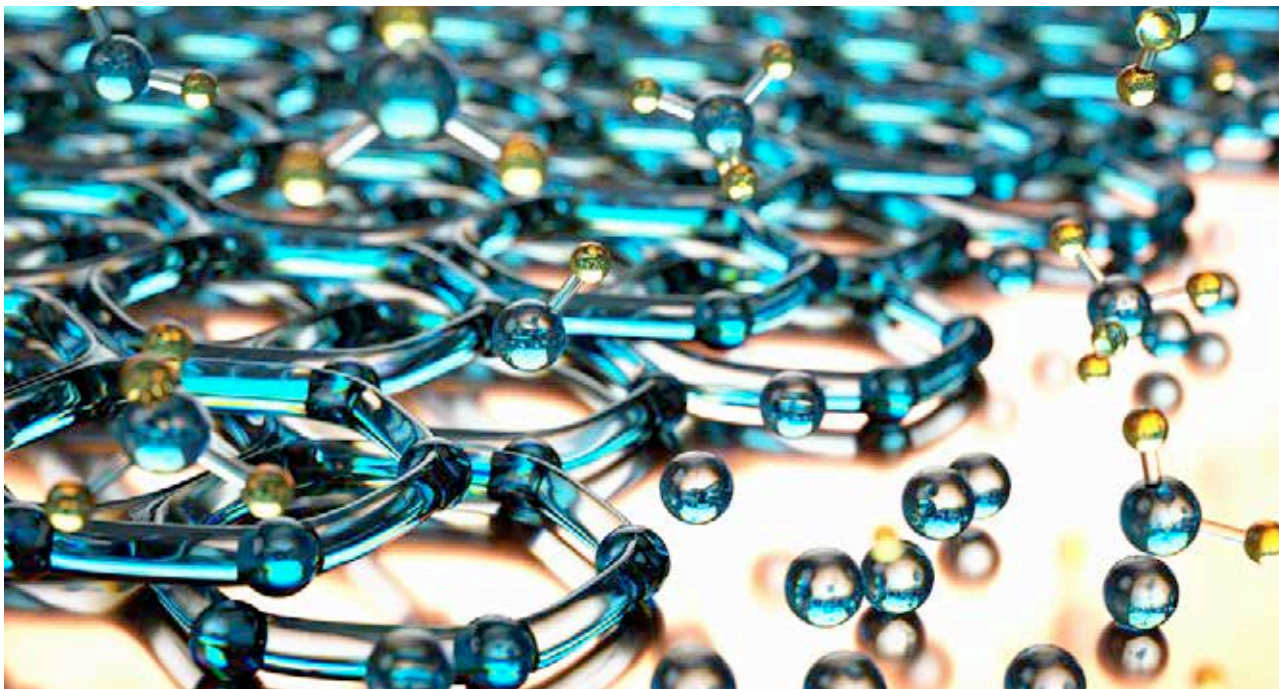
Es justo citar que otros investigadores, antes que el equipo premiado por el Nobel, habían previsto la estructura del fullereno. Eiji Osawa (Tayama, Japón, 1935) había predicho en 1970 la estructura de la molécula corannulene en la Toyahashy University of Technology de Japón, pero publicó sus hallazgos en una revista local y en japonés, lo que impidió su difusión; la estructura también había sido propuesta por RW Nelson, de la Atomic Energy Research Establishment (USA) en ese mismo año, pero su publicación fue rechazada (se publicó en 1999). También ha de citarse al equipo de Rohlving, Cox y Kaldor, que encontraron racimos de átomos de carbono en prospecciones petrolíferas en el seno de la empresa petrolera Exxon.

Si los fullerenos llevan milenios viajando por el espacio y alcanzando la Tierra, ¿dónde estaban que no los hemos encontrado hasta hace tan poco? Estaban, vaya si estaban. Como se mostró, por ejemplo, en 1998 cuando se encontraron fullerenos naturales en el mineral shunguita, procedente de las minas Kondopoga, en Karelia (Rusia): Se encontraron fullerenos de 24 a 70 átomos de carbono.

Entonces, ¿el carbono terrestre procede del espacio? Son muchas las teorías que así lo postulan; incluimos entre ellos al bioquímico catalán Joan Oró (1923-2004), uno de los primeros en proponer la idea de que durante el bombardeo de la Tierra a lo largo de millones de años los meteoritos y cometas habrían traído gran parte del agua y posiblemente los componentes de la materia orgánica (entre ellas el carbono) necesarios para la evolución de la vida.

La historia que les he contado tiene muchos matices que por simple ahorro omito explicarles, aunque pretende resumir el encuentro de una estructura molecular hasta hace poco impensable, precisamente por una cuestión que curiosamente suele lastrar el propio avance científico, la misma traba con la que se encontró Kekulé para postular la estructura del benceno: existe una corriente contraria –o al menos refractaria– a modificar el pensamiento instaurado en la propia ciencia, al igual que ocurre en otros aspectos de nuestro comportamiento social. Hasta hace poco se pensaba que la química del carbono se conocía en su totalidad, cuando en realidad estamos permanentemente desarrollando nuevos compuestos de síntesis con estructuras realmente novedosas.

Las elucubraciones que inició Eiji Osawa y que condujeron a la resolución de la estructura de la molécula del buckyball por el equipo de Kroto, Smalley y Curl se enfrentaban a ese pensamiento refractario que suele impedir los avances. Y también al omnipresente problema que debemos solucionar los que nos dedicamos a la geodesia, cual es generar formas curvas estables a partir de elementos rectilíneos, un sistema de ideas que en nuestro estudio denominamos “pensamiento triangular”. Más adelante entraremos en esta materia, que pretende resolver algo tan aparentemente sencillo como curvar un plano de una forma racional.



simple carbono

La estructura general de los compuestos en los que interviene el carbono es conocida desde hace decenios; los estudiantes de esta rama de la química, para diferenciarla de otras, la abordamos bajo el nombre "química orgánica". Este término fue acuñado en 1807 por J. J. Berzelius para nombrar la rama de la química que estudia los compuestos procedentes de fuentes naturales; suscrito a la teoría del Vitalismo, sostenía que los sistemas naturales poseían una "fuerza vital" que no existía en los sistemas inertes o no vivos: no iba descaminado.

Desde esa fecha hasta final del siglo XX se han producido grandes avances, pero siempre acogidos a una serie de reglas que se han ido instaurando con solidez en el llamado "cuerpo" de la ciencia. En estos 200 años de química del carbono hemos ido ideando y aplicando modelos que han permitido el desarrollo tecnológico del que ahora disfrutamos: la química (cada vez más física y matemática) envuelve nuestra sociedad y afecta desde el aire que respiramos hasta cualquier alimento que ingerimos, sin olvidar la vestimenta, el transporte, la energía que nos sostiene y nuestra forma de relacionarnos, incluso la gestión de las emociones. Pero al parecer nos faltaba información, porque a finales del siglo XX asistimos a sorprendentes descubrimientos que están cambiando la concepción de la química moderna, en especial la química del carbono.

Uno de esos conjuntos de "reglas establecidas" se refiere a la geometría molecular; es decir, al apartado de la química que estudia la estructura formal y la distribución espacial de los compuestos químicos. Hablar de geometría molecular resulta extraño a priori, porque los átomos y sus agregados –las moléculas– no son cuerpos sólidos; es decir, no tienen una forma sólida apreciable y por tanto difícilmente se pueden asimilar a reglas geométricas convencionales; en realidad nos referimos a partículas, a nubes electrónicas, a probabilidad de ubicaciones, por cierto, en movimiento: no se pueden imaginar a qué velocidad circulan.

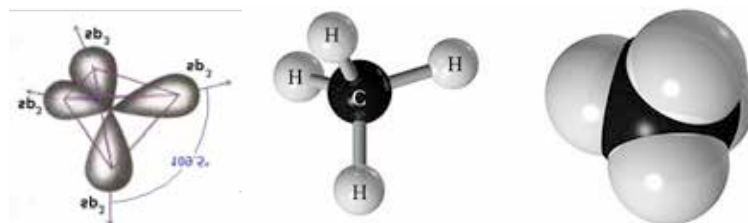
Les voy a simplificar el modelo de trabajo que usamos en química: suponemos figuras en las que los átomos están integrados por un núcleo central (en el que reside, entre otras cosas, la práctica totalidad de la masa) y por minúsculos electrones periféricos que lo orbitan. En este modelo, una molécula es un agregado ordenado por diversas formas de enlazamiento, de varios átomos (desde dos hasta un número incontable).

Pongo un ejemplo: tome una bombilla (con su portalámparas y su cable, encendida) o más sencillo aún, una linterna y, en la oscuridad, agítela generando dibujos. Podrá obtener líneas, círculos, incluso –con habilidad– figuras geométricas. En realidad se trata de una lámpara en movimiento y es precisamente este raudo movimiento el que parece generar geometrías. A eso nos referimos con el concepto de geometría molecular.

Para hacernos una idea aproximada de la dimensión de un átomo, podemos pensar en un gran estadio de fútbol. El núcleo del átomo sería como un guisante colocado en su centro y los electrones (de tamaño de levísimas motas de polvo) se encontrarían en la parte de arriba de las gradas del estadio, girando alrededor del campo de juego; debe suponer el lector que el núcleo es 10.000 veces menor que el total del átomo. Entre el núcleo y la corteza (las gradas del estadio), espacio vacío; es decir, nada. Como digo, a la altura de las gradas orbitan las motas de polvo –que interpretan los electrones– a una velocidad vertiginosa. En éste nuestro modelo, los electrones se mueven siguiendo una órbita que va desde el centro del campo (alrededor del guisante) hasta su asiento (cada uno al suyo) en la grada.

Cuando logre construir esta imagen en su imaginación, piense en las líneas que generarían esos electrones si estuviéramos a oscuras y ellos dispusieran de luz: observaría su trayectoria trazada. O bien piense que pudiéramos parar el tiempo y así estacionar esos locos electrones por un instante, para saber por donde andan.

Pues bien, este modelo así descrito sigue siendo poco práctico para representar las agrupaciones de átomos en moléculas en una hoja de papel, más allá de un esquema plano. Así que para representar la tridimensionalidad, inventamos el modelo de bolas y palitos, de forma que las bolas representan los átomos mientras los palitos –los enlaces– los sostienen en el lugar en el que se supone que deberíamos encontrarlos si lográramos congelar su universo, algo que puede ser cierto cerca de -273 grados Celsius, el cero absoluto.



modelos de la molécula de metano: de izq. a dcha.: nubes, palitos+bolas y bolas

Pues bien, con esos palos y bolas ya es posible jugar a geometrías, algo que gusta a los humanos (especialmente en la infancia); resulta también interesante para comunicarnos. Podemos fabricar figuras geométricas, esbozar ángulos e imaginar distancias; es decir, podemos administrar el concepto “locus”. También suponer elementos que se aproximan y/o alejan, giros siguiendo un eje, distancias relativas, dimensiones, etc.

Todo esto me trae a la memoria a uno de mis profesores de la asignatura de Química Orgánica en la Facultad de Farmacia de Sevilla. Allí estudiamos química en diversas asignaturas a lo largo de toda la carrera, algunas de ellas francamente difíciles. El caso es que se le atragantaba a más de un estudiante, entre ellos a mí y a mi amigo y compañero Kiko Marín. A fuerza de horas de estudio logramos imaginar esos entornos espaciales y para comprenderlos dibujábamos espléndidos esquemas moleculares, que fueron evolucionando hasta adquirir cierta apariencia artística. Todo a la búsqueda del ansiado y escaso aprobado.

Hasta que un día, en la grave y delicada situación que supuso una revisión de examen con ese profesor, este se empleó a fondo y con razones de peso para explicarme el porqué de mi suspenso. Cuando me marchaba cariacontecido, ya en la puerta de su despacho, me espetó: "Otra cosa, Sr. Doncel: los electrones no hacen sombra". Y es que mi amigo Kiko (hoy día farmacéutico e investigador) y yo representábamos esos modelos moleculares de una forma tan primorosa que los átomos esféricos disponían de sombras de volumen, los electrones tenían "cola" (como los cometas) y al pasar cerca de los átomos ¡proyectaban sombra en su superficie!

Esa simple llamada de atención me ha servido de mucho, en especial para esforzarme en imaginar de una forma más real esos complejos entornos espaciales que en la práctica suponen las tripas de la materia.

En realidad, todo esto de los átomos y las moléculas es algo más intrincado y debe entenderse como complejos entornos electrónicos: microespacios o "locus" en los que los electrones (integrados a su vez por subpartículas) orbitan alrededor de núcleos, que pueden viajar de uno a otro, intercambiando partículas y energía, modificando con su presencia esos espacios, todo ello a gran velocidad y en unos espacios en los que lo más abundante es... el vacío. Nubes que en realidad no son más que probabilidades de encontrar un electrón en un determinado lugar (por cierto, imposible de localizar con exactitud, aplicando el Principio de Incertidumbre de Heisenberg). Expreso todo esto consciente de los avances actuales en la física de las partículas, un modelo en continua revisión que no deja de ofrecernos sorpresas.

Cuando estudiaba en la Facultad de Farmacia de Sevilla (y posteriormente en mis estudios de química en la Universidad de Extremadura) trabajábamos con un modelo denominado estructura-actividad. Ese modelo se basa en la hipótesis de que los receptores celulares (a los que pretendemos dirigir los fármacos) tienen una determinada disposición espacial y por tanto las moléculas, para ejercer su actividad, han de acoplarse a esa estructura, como un transbordador espacial al soporte de recepción de su nave nodriza en la inmensidad del espacio. No solo acoplarse, sino que una vez logrado, deben interactuar electrónicamente de una determinada manera, como una llave con su cerradura, para así ejercer su

efecto; y aunque es posible que más de una llave entre en una cerradura, solo la acertada la activa.

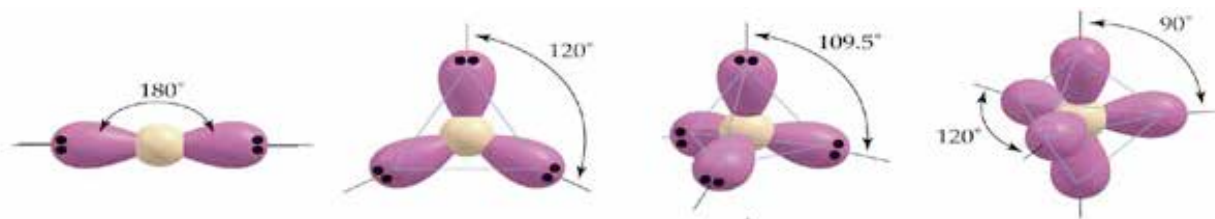
Disponemos de dos formas de obtener soluciones. Una de ellas supone el consabido método de ensayo y error, o bien de observación espontánea de efectos tras administrar –o exponer de forma casual– un compuesto. Así acertamos a usar la quinina contra la malaria o la Aspirina® contra la fiebre: observamos que actuaban generando mejoras.

La otra manera implica conocer a fondo esos receptores para así poder fabricar fármacos (moléculas) a medida. Para ello se comenzaron a usar, a mediados de los años 70 del siglo pasado, programas y sistemas informáticos que facilitaban esa ingente tarea, acudiendo al

diseño computacional hoy día tan extendido. Ahora resulta habitual trabajar con herramientas de diseño asistido en entornos tridimensionales, pero entonces era una herramienta al alcance de pocos. Esas rutinas contenían el catálogo de átomos disponibles (por ejemplo, carbono, fósforo, nitrógeno, oxígeno, etc.) y sus combinaciones, con las diferentes geometrías conocidas y sus características electrónicas inherentes.

De forma que para "diseñar" una molécula aplicamos el conocimiento estructural –geométrico– y electrónico de los átomos implicados y probamos a insertar nuestro diseño en el lugar (locus) del receptor; parece una tarea sencilla, pero han de saber que las posibles rotaciones, la concurrencia de isómeros, la quiralidad molecular y otras muchas variables (como el entorno electrónico del receptor) convierten en ardua una tarea que ofrece, para un simple agrupamiento de 20 o 30 átomos, miles de posibilidades; para ello nos ayudamos de potentes sistemas informáticos.

Por ejemplo, conocíamos bien el átomo del carbono. Les resumo que de ese átomo, por razones en las que no voy a extenderme, sabíamos que dispone básicamente de tres posibilidades geométricas de enlazarse con otros elementos y/o con otros átomos de carbono.



Conocíamos sus angulaciones, sus afinidades electrónicas y posibilidades conectivas; y con esa información nos disponíamos a construir moléculas, como si de un puzzle tridimensional se tratara.

Con similar criterio podemos usar las simetrías de numerosos átomos y sus moléculas.

No es mi intención ofrecer una visión simplista del problema, pero como les digo, todo esto es una simplificación que me permito para facilitar esta explicación.

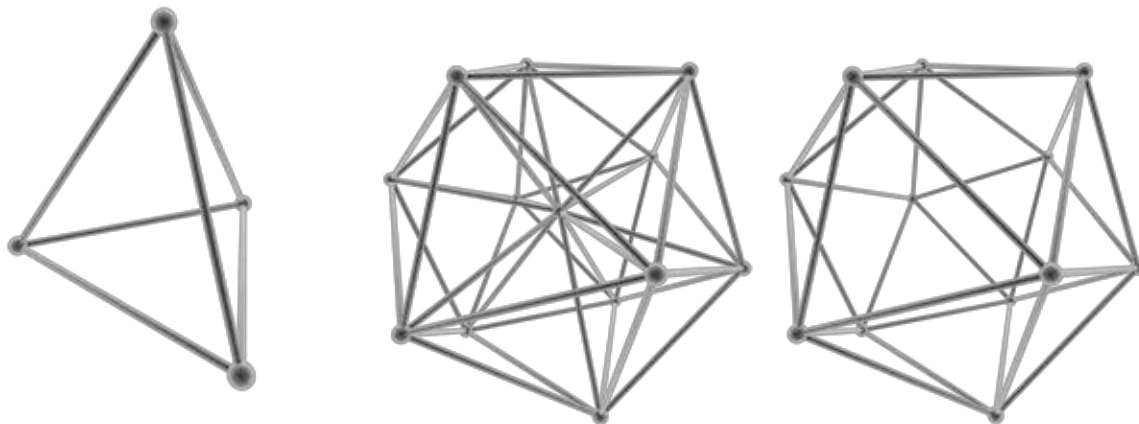
En páginas anteriores les mostraba una molécula de metano, usando el sistema de bolas. Sabemos que su "simetría" es tetraédrica regular; los cuatro enlaces se dirigen a cuatro direcciones siguiendo un ángulo de 109,5 grados.

Para poner de manifiesto esta singularidad geométrica, hemos construido esta maqueta en la que se muestra una molécula de metano inscrita en un tetraedro, que nos permite observar y entender su geometría.

El tetraedro es uno de los cinco poliedros regulares de Euler, o cinco sólidos regulares de Platón: supone "la primera excursión fuera del plano"; en estos sólidos sus caras están formadas por un solo tipo de polígono regular. Nuestra pasión por la geometría tetraédrica nos animó a elaborar en mi estudio la obra "El anillo de Schödinger" que ocupó durante dos años a un amplio equipo creativo; más adelante les hablaré de ello.



Su geometría es sencilla: seis aristas y cuatro vértices que generan un poliedro sólido de cuatro caras, que no obstante ofrece numerosas dificultades de manejo en el esquema de pensamiento humano debido, fundamentalmente, a que su ángulo diedro es de algo más de 70 grados, lo que choca con la geometría diédrica a 90 grados que habitualmente usamos. Su apilado ofrece dificultades, pero si lo hacemos conectando 20 de ellos por un único vértice obtenemos una figura denominada icosaedro, un poliedro –el quinto sólido platónico– de 20 caras. El icosaedro que ven en la siguiente figura está construido conectando 20 tetraedros, de forma que cada una de sus caras vistas es la "base" de cada uno de ellos.



Si ahora truncamos –cortamos– los vértices del icosaedro obtenemos un nuevo sólido arquimediano (es decir, formado por dos o más tipos de polígonos regulares), antes conocido como icosaedro truncado y ahora ya denominado fullereno, futboleno o buchyball. Observarán que el aspecto resulta tremendamente familiar, porque coincide con el de un balón de fútbol clásico.



Se trata de un poliedro de 90 aristas y 60 vértices que generan 32 caras, 12 de ellas pentagonales y 20 hexagonales, en ambos casos regulares. Como saben, es habitual que en un balón, los hexágonos y los pentágonos se pinten de diferentes colores.

Ese icosaedro truncado, el C₆₀, fullereno o “molécula de Texas” (así fue declarada en 1997) es la molécula más simétrica conocida, pues dispone de 180 operaciones posibles. Dispone de tres ejes de rotación; hasta los -13 grados centígrados gira libremente y hasta los -183 grados –temperatura en la que permanece inmóvil– adquiere diversos posicionamientos.

No es este lugar para describir la química de esa molécula ni las propiedades que la hacen única, porque lo que me resulta interesante –además de la epopeya de su descubrimiento– en su estructura.

geometrías imposibles

Les he narrado este extenso prefacio sobre el carbono y el descubrimiento del fullereno para ponerles de manifiesto la magnitud del planteamiento.

Hasta hace bien poco era impensable una estructura basada en el carbono que no observara una determinada configuración espacial. Las dificultades del equipo de Kroto se fundamentaban precisamente en ese pensamiento refractario que nos lleva a asegurar que las cosas han de ser de una determinada forma y que solo es posible su existencia si se cumplen una serie de normas establecidas: el avance en el diseño molecular estaba contaminado por la consideración de esas angulaciones "patrones" que se entendían inamovibles.

Como decía, esta postura ha lastrado desde tiempos inmemoriales el avance de la ciencia y el propio desarrollo de conocimiento humano. Las angulaciones conocidas del carbono son las que son, se pensaba, de forma que el catálogo de objetos posibles se restringía a combinaciones de esas angulaciones, siendo las demás -imaginadas- imposibles. Craso error.

En el caso que nos ocupa, era impensable que una lámina compuesta por hexágonos regulares pudiera curvarse hacia formas esféricas, como efectivamente así es. Para ello es necesario que intercalemos pentágonos en su mallado: al hacerlo introducimos una pequeña angulación que curva la lámina. De suerte que para construir una esfera de hexágonos no hay más que intercalar periódicamente pentágonos; por ejemplo, en la estructura del fullereno hay intercalados 12 pentágonos entre un total de 20 hexágonos.

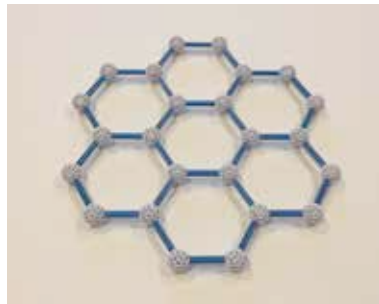
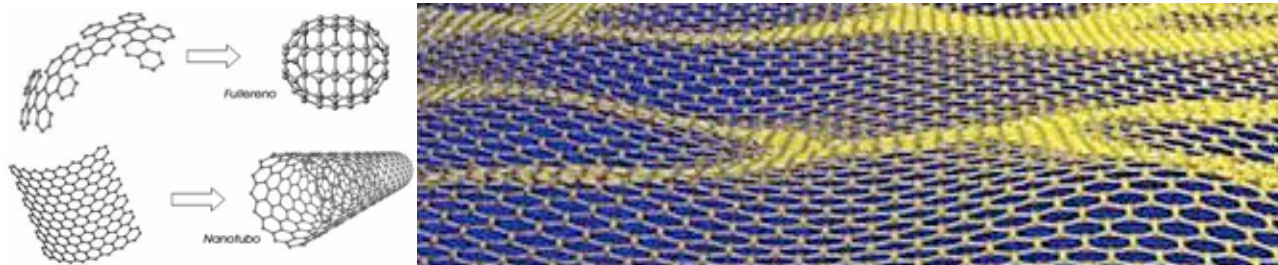


lámina estructural de hexágonos (plano) y lámina curvada con un pentágono inscrito

Como explicaba anteriormente, seguramente fuera el japonés Eiji Osawa, en 1970, el primero en predecir -ojo, en el ámbito de la química- esta posibilidad geométrica, cuando estudiaba la molécula corannulene en la Toyahashy University of Technology de Japón; iniciativa que fue después confirmada por Smaley mientras buscaba la forma de organizar los 60 átomos de carbono jugando con hexágonos de papel y recordando la forma que usó Richard B. Fuller para solucionar sus cúpulas geodésicas; entonces resolvió definitivamente la forma esférica del fullereno.



fullereno, nanotubo y lámina de grafeno

Hoy día sabemos (por la existencia de unas moléculas denominadas "nanotubos") que las láminas hexagonales de carbono se pueden curvar en una dimensión. De hecho ya se fabrican nanotubos de diferente configuración y en masa, con múltiples aplicaciones, que algunas revolucionarán –en breve– los materiales actuales, según predicen los científicos.

En realidad, esta forma de construir esferas mediante triangulación (en el caso del fullereno se trata de hexágonos y pentágonos regulares; es decir, poliedros formados por triángulos) ya se conocía en otras disciplinas relacionadas con la geometría. El estudio de la geometría de formas sólidas con aspecto más o menos esférico ha apasionado al hombre desde hace milenios, como explicaré en este otro relato, esta vez narrado en el sentido de la flecha del tiempo.



instalación The Life´s Secret / alfonso doncel y luis manuel lópez

sólidos platónicos... desde el neolítico

Podríamos citar a cientos de autores o de nombres significativos en el desarrollo del conocimiento geométrico, germen del cálculo geodésico, pero citaremos solo algunas referencias, todas de sobra conocidas, que han construido el cuerpo del saber actual sobre esta configuración geométrica.

Sabemos que desde tiempos antiguos, los poliedros regulares denominados "sólidos platónicos" han despertado el interés de la humanidad, aunque precisamente de la referencia más antigua conocida disponemos de muy poca información: las bolas de piedra tallada encontradas en Kincardineshire, Aberdeenshire y Banff en Escocia, que actualmente se pueden contemplar en el Museo Ashmolean de Arte y Arqueología de la Universidad de Oxford.



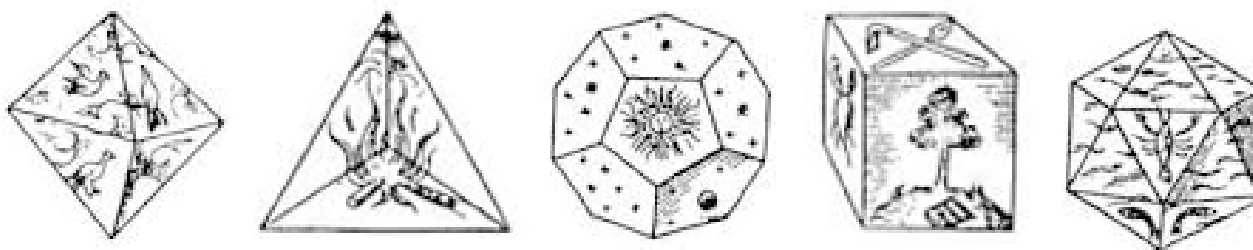
El propósito de estas piedras es aún desconocido y sigue desconcertando a los arqueólogos. Están hechas de diferentes minerales, como arenisca o granito, y datan del periodo Neolítico, entre 3.200 y 2.500 años a. C. Se han encontrado más de cuatrocientas piedras en Escocia e, incluso las cinco piedras del Museo Ashmolean, todas tienen algo peculiar en su superficie.

Su tamaño es bastante uniforme, de alrededor de siete cm de diámetro. Se han encontrado principalmente en Escocia, aunque también en el resto de Gran Bretaña e Irlanda, desde las que carecen de ornamentación (aparte de las protuberancias) a las que tienen patrones de grabado extensos y altamente variados. Una amplia gama de teorías se han planteado para explicar su uso o significado –sin que ninguno haya obtenido suficiente aceptación–, aunque sin duda disponen de una base geométrica y aparentemente próxima a la de los sólidos platónicos.

A finales de 1970 se habían registrado un total de 387 de estas; la mayor concentración (169 unidades) se encontró en Aberdeenshire. En 1983 la cifra había aumentado a 411 y en la segunda década del siglo XXI se tenían contabilizadas 425. En 2013, los arqueólogos descubrieron una bola de piedra tallada en el Ness de Brodgar, un hallazgo in situ y en un contexto arqueológico conocido, ya que hasta entonces casi todas habían sido encontradas descontextualizadas, lo que las hacía no datables.

El estudio sistemático de la geometría quizás comenzara con los sólidos platónicos, poliedros convexos en los que todas sus caras son polígonos regulares iguales entre sí y en los que todos los ángulos sólidos son iguales.

Los primeras referencias conocidas se deben a Pitágoras (475 a.C.), filósofo y matemático griego considerado el primer matemático puro, que impulsó de manera significativa la geometría y la aritmética, desarrollando aplicaciones en materia de pesos y medidas, la música y la astronomía. Sus principios influyeron tanto en Platón como en Aristóteles y –de manera general– en el desarrollo de la matemática y la filosofía racional en Occidente; aunque no se conserva ningún escrito original de Pitágoras, sabemos de su conocido teorema sobre los triángulos rectángulos.



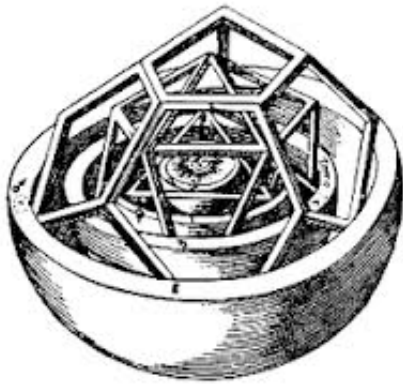
Fue Platón (427-347 a. C.) a quien se atribuye haberlos estudiado en primera instancia; por ello se conocen como cuerpos platónicos, aunque también como sólidos pitagóricos, sólidos perfectos o, sobre la base de propiedades geométricas, poliedros regulares convexos.

Los sólidos platónicos son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro. Se trata de una lista cerrada, ya que es imposible construir otro sólido diferente de los cinco anteriores que cumpla todas las propiedades exigidas; es decir, convexidad y regularidad.

Al parecer, en la escuela pitagórica solo se conocían el tetraedro, el cubo y el dodecaedro; se atribuyen el icosaedro y el octaedro a un amigo de Platón, Teeteto, a quien se debe el estudio sistemático de los cinco poliedros regulares. En su libro el Timeo, Platón pone de manifiesto la relación entre los cuatro primeros sólidos platónicos y los cuatro elementos primarios (tierra, agua, fuego y aire). Del quinto poliedro regular, el dodecaedro, dice: "Quedaba aún una sola y única combinación; Dios se sirvió de ella para el Todo cuando esbozó su disposición final".

Para Platón, la belleza de los poliedros regulares no reside en su apariencia física, sino en el ámbito del pensamiento matemático: "cada uno de los cinco sólidos participa en la idea de sólido regular e inversamente esta idea se plasma en cinco casos particulares" (La República).

Poco después Euclides (325-265 a. C.) ofreció una descripción matemática completa de los sólidos platónicos en su libro Los Elementos; el Libro XIII está dedicado a sus propiedades. En él describe la construcción del tetraedro, octaedro, cubo, icosaedro y dodecaedro. Para cada sólido, Euclides encuentra la relación entre el diámetro de la esfera circunscrita a la longitud del borde.



Mucho después –ya en el siglo XVI– el astrónomo alemán Johannes Kepler intentó encontrar una relación entre los cinco planetas conocidos en ese momento (excluyendo la Tierra) y los cinco sólidos platónicos. En *Mysterium Cosmographicum*, publicado en 1596, Kepler estableció un modelo del sistema solar en el que los cinco sólidos se establecen uno dentro de otro, separados por una serie de esferas inscritas y circunscritas. Las seis esferas correspondían a cada uno de los planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno). De esta manera la estructura del sistema solar y las relaciones de distancia entre los planetas fue dictada por los sólidos platónicos. Al final, la idea original de Kepler tuvo que ser abandonada, pero supuso la constatación de que las órbitas de los planetas no son círculos, y supuso un avance en el conocimiento de las leyes del movimiento planetario.

La cultura árabe (año 1300) protagoniza la base del conocimiento sobre el concepto de teselación, término que hace referencia a una regularidad o patrón de figuras que recubren o pavimentan completamente una superficie plana, que ha de cumplir dos requisitos: que no queden espacios libres y que no se superpongan las figuras, algo verdaderamente importante en el diseño de estructuras geodésicas, ya que se trata de superficies, aunque esféricas.

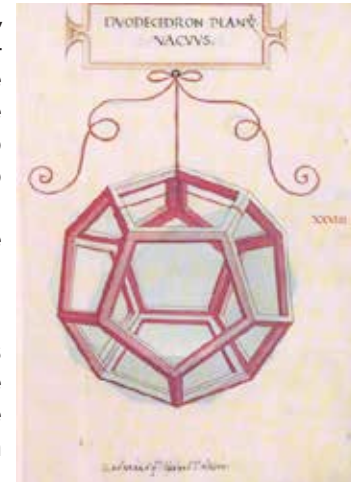
Los teselados se crean usando transformaciones isométricas sobre una figura inicial; es decir, copias idénticas de una o diversas piezas –o teselas– con las que se componen figuras, con el fin de recubrir entera y homogéneamente una superficie.

Distintas culturas a lo largo de la historia han utilizado esta técnica para formar pavimentos o muros de mosaicos en catedrales y palacios. Algunos mosaicos sumerios con varios miles de años de antigüedad contienen regularidades geométricas.



La teselación ha sido ampliamente estudiada a lo largo de la historia, casi siempre a cargo de geómetras; Arquímedes –en el siglo III a. C.– hizo un estudio acerca de los polígonos regulares que pueden cubrirlo. Johannes Kepler estudió los polígonos regulares que pueden cubrir el plano, en su obra *Harmonice mundi*, de 1619; además, realizó estudios en tres dimensiones de los sólidos platónicos. Entre 1869 y 1891, el matemático C. Jordan, el cristalógrafo E. K. Fiodorov y la psicóloga C. Rial estudiaron ampliamente las simetrías planares e iniciaron así el estudio sistemático y profundo de los teselados.

En la historia de la geometría es imprescindible citar a Luca Pacioli, en realidad Fray Luca Bartolomeo de Pacioli (Sansepolcro, 1445-1517), un fraile franciscano, matemático precursor del cálculo de probabilidades y economista italiano. Su obra más divulgada e influyente es *De Divina Proportione*, que hace referencia al término relativo a la razón o proporción ligada al denominado número áureo y que trata también de geometría. Para ilustrarlo encargó dibujos a Leonardo da Vinci, que en esa época formaba parte de la corte milanese de Ludovico Sforza.



El físico y matemático suizo Leonard Euler es determinante respecto a asuntos de geometría. Ha sido uno de los matemáticos más prolíficos y se calcula que sus obras completas reunidas podrían ocupar entre 60 y 80 volúmenes. Una afirmación atribuida a Pierre Simon Laplace expresa la influencia de Euler en los matemáticos posteriores: "Lean a Euler, lean a Euler; él es el maestro de todos nosotros".

En 1750, Euler publicó su teorema de poliedros, que refiere la relación entre el número de caras, aristas y vértices de un poliedro convexo (sin orificios ni entrantes). El famoso teorema permite obtener el área de un poliedro convexo cualquiera; también concluye que solo pueden ser cinco los sólidos regulares y establece para ellos una serie de relaciones. El teorema de Euler para poliedros convexos postula que

$$\text{Caras} + \text{Vértices} - \text{Aristas} = 2$$

Es decir, que la suma del número de caras y de vértices menos el de aristas de un poliedro cerrado debe ser igual a 2.

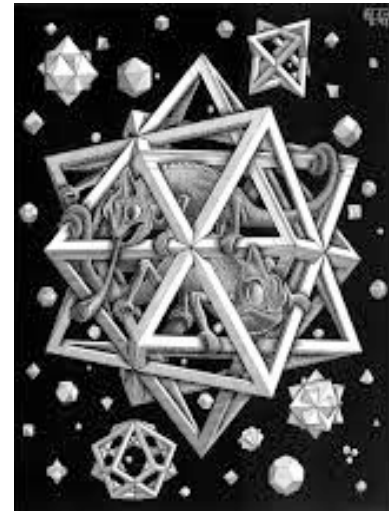
El teorema de Euler es determinante en la construcción de formas cerradas y en particular en el diseño de formas geodésicas estandarizadas utilizando los métodos clásicos o basados en la geometría convencional. En mi experiencia, la observación de este teorema (a la hora de diseñar en geometría) es imprescindible para generar formas estables, refiriéndome con ello a la obtención de estructuras poliédricas que contemplen relaciones óptimas entre angulación, longitud de barras estructurales y volúmenes resultantes.

Otro personaje clave en la geometría y la teselación es el artista holandés Marcos Cornelius Escher (1898-1972) quien, por sugerencia de su amigo el matemático HSM Coxeter aprendió los teselados hiperbólicos, lo que motivó su interés por el palacio de La Alhambra (Granada), generando un sinnúmero de bellas, curiosas y misteriosas obras de arte.

La obra de Escher, basada en grabados xilográficos o al mezzotinto y en dibujos, consisten en figuras imposibles, teselados y mundos imaginarios. Su obra experimenta con diversos métodos de representar, en dibujos de 2 o 3 dimensiones, espacios paradójicos que desafían a los modos habituales de representación.

A lo largo de su carrera, Escher realizó más de 400 litografías y grabados en madera, y también unos 2.000 dibujos y borradores. Al final de su carrera destruyó algunas de las planchas para que no se realizaran más reproducciones de originales. También existen estudios y borradores de muchas de sus obras, en ocasiones versiones de algunas de ellas. Muchas de sus obras se vendieron masivamente poco después de su muerte y están esparcidas por el mundo; un grupo importante está expuesto de forma permanente en el Museo Escher en La Haya, Holanda.

Como artista, M. C. Escher resulta difícil de clasificar. Se han hecho múltiples interpretaciones de sus obras, pero la realidad es que Escher no tenía grandes pretensiones ni mensajes que transmitir: básicamente plasmaba lo que le gustaba. No tomaba como referencia para su trabajo los sentimientos, como otros artistas, sino que simplemente ideaba situaciones y soluciones a problemas, juegos visuales y paradojas espaciales.



Él mismo reconocería que no le interesaba mucho la realidad, ni la humanidad en general, las personas o la psicología, únicamente las cosas que pasaban por su cabeza. En cierto modo era alguien introvertido e incluso de trato difícil, que prefería crear su propio universo.

Podemos ampliar esta larga lista hasta lo interminable, citando, por ejemplo, a Fibonacci, a Penrose, etc. Pero acercándonos a la actualidad, citaré a dos matemáticos rusos: Boris N. Delaunay (1890-1980), que ideó el algoritmo de triangulación que lleva su nombre, utilizado en el modelado de superficies definidas por puntos, y a G. F. Voronói (1868-1908) que, entre otros descubrimientos, es conocido por haber definido los diagramas que también llevan su nombre; sin duda, ambos han contribuido decisivamente al desarrollo de la triangulación geométrica.

Sin embargo, de todos los citados, nuestro personaje favorito es un diseñador y pensador americano que ya hemos citado: Richard Buckminster Fuller, precisamente a quien debe su denominación la molécula fullerenó, también denominadas buchyesferas (a Fuller le llamaban cariñosamente Bucky).

Bucky Fuller

Me llama la atención que la persona que más impulso ha ofrecido a la geometría geodésica lo haya hecho desde la perspectiva del diseño conceptual; en realidad se trataba de un pensador y también visionario, arquitecto, ingeniero y físico que disponía de muchos medios y conocimientos, pero sobre todo de una inteligencia prodigiosa, una portentosa visión de futuro y una gran capacidad emprendedora.

Richard Buckminster Fuller nació en el seno de una respetada familia de Massachusetts (USA), pero abandonó la Universidad de Harvard, a la que habían asistido todos los varones Fuller desde 1740, para convertirse en autodidacta y dedicarse a empleos varios. Se podría describir como ecologista, visionario, arquitecto, matemático, cartógrafo o maestro: en realidad fue un genio multidisciplinar.

Podríamos hablar de Fuller durante páginas, pero me centraré en lo que le ha convertido en mundialmente conocido: diseñador y constructor de estructuras geodésicas. A modo de anécdota contaré que durante algo más de una década, Fuller se desplazó como profesor investigador a la Southern Illinois University, institución ubicada en el pequeño poblado de Carbondale (USA). En 1960, el nuevo profesor, que ya contaba con 65 años, irrumpió estrepitosamente en aquella tranquila ciudad con una troupe de obreros y estudiantes para construirse una casa.



Bajo la atónita mirada de sus vecinos, la obra fue tomando rápidamente la forma de algo que, hasta entonces, solo habían podido ver en aquellas películas de ciencia ficción que últimamente se habían hecho tan populares: una nave espacial, un auténtico platillo volante.

Esa "nave espacial" era, en realidad, una cúpula geodésica: la forma más resistente, ligera y eficiente de cubrir un espacio conocida por el hombre, tal y como la definiría en 1970 el American Institute of Architects. En concreto, era una cúpula geodésica icosaédrica truncada de frecuencia 3, con un diámetro de 12,15 m y una estructura portante de madera de 1.800 kg, un peso equivalente al de un automóvil de gama alta.

Años antes Fuller, junto a su equipo y en particular con su socio y arquitecto Shoji Sadao desarrollaron numerosas cúpulas geodésicas; comenzaron a colaborar en 1954 y su primer gran proyecto fue la enorme cúpula geodésica para el pabellón de la Exposición Mundial de 1967, en Montreal.

El éxito más conocido de Fuller fue la consecución de un sistema constructivo que eliminaba las ventanas (o agujeros irregulares) en el diseño de tramas superficiales, algo que suele ocurrir a quienes abordamos el diseño de tramas geodésicas por diferentes sistemas.

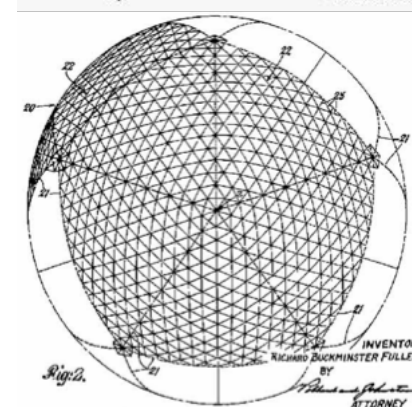
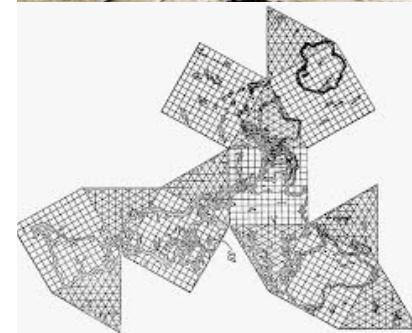
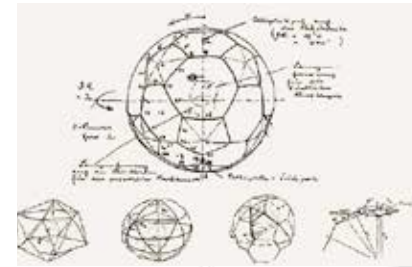
Lo consiguió con la denominada "trama Triacón", generada por el colaborador de su empresa Geodesics Inc. Duncan Stuart en 1951, fruto de una de esas casualidades que se citan en la historia de las serendipias científicas, aunque la estrategia más usada -y que seguimos usando en la actualidad- fue su denominada "trama truncada".

Las tramas regulares diseñadas hasta la fecha tenían, en determinados vértices, círculos diametrales cuyos encuentros no coincidían en el mismo punto de la superficie. Fuller pensaba en errores en las tablas trigonométricas e incluso en un "mensaje de Dios" para avisarle de algún error. Stuart (que era matemático y pintor) acudió a la referencia que usamos casi todos los que nos dedicamos a la geodesia: un polígono regular, casi siempre el icosaedro, para proyectar sobre una esfera, desde su centro y tomando como referencia sus vértices y caras en la esfera circunscrita, creando subdivisiones.

Es justo explicar, en este momento, que la primera estructura geodésica conocida fue concebida 20 años antes. El Dr. Walther Bauersfeld (1879-1959), ingeniero jefe de la firma Carl Zeiss en Jena, diseñó y fabricó - en 1922- una gran cúpula geodésica para alojar un planetario.

Para construirla se basó en un poliedro de 12 caras pentagonales y 20 hexagonales, obtenido mediante el truncamiento de los vértices en un icosaedro; es decir, se basó en la estructura de un icosaedro truncado o fullereno.

A partir de esta lógica, Bauersfeld ideó una estructura con barras de acero basada precisamente en una subdivisión del icosaedro, en la que las barras se disponían según arcos de círculos máximos de la esfera.



Esta estructura, una vez recubierta de hormigón, pasó a ser también la primera estructura laminar en hormigón armado. De hecho, fue su carácter de lámina de cobertura y no la geometría poliédrica de su armadura de refuerzo lo que trascendió en ese momento.

Fuller llegó años después a una solución esencialmente igual a la que propuso Bauersfeld, aunque es cierto que desde fines de la década de 1930 se interesaba por representaciones alternativas del globo terráqueo.

La proyección del globo terráqueo sobre el plano supone un problema similar al que debió resolver Bauersfeld: trasladar una superficie esférica sobre un mosaico de superficies planas, en este caso las caras de un cuboctaedro. En el mapa que Fuller llamó "Dymaxion", se establece una correspondencia entre la ubicación de un determinado punto de la esfera y la situación que le corresponde sobre el plano a partir de ubicar dicho punto en una retícula de arcos de círculo máximo cuya proyección gnomónica sobre la correspondiente cara plana del poliedro es una línea recta.

Si examinamos el detalle de la retícula en la cara triangular que se incluye en la patente 6 del mapa Dymaxion (imagen superior), encontraremos un parecido sorprendente con la estructura de Bauersfeld.

La cúpula de Bauersfeld había sido objeto de patente, pero solo respecto a su estructura de hormigón armado y sin citar la geometría de la malla estructural, lo que permitió a Fuller atribuirse, treinta años más tarde (1951) la paternidad "de un armazón esférico cuyos elementos estructurales se interconectan en un diseño geodésico que forman una retícula tridireccional". Ya para esta fecha Fuller abandonó el cuboctaedro como poliedro base, tomando -como lo hizo Bauersfeld- el icosaedro como punto de partida para su estructura.

El primer intento de sistematizar los procedimientos para la obtención de las particiones geodésicas de la esfera se realizó en la Southern Illinois University (Campus de Carbondale) bajo la dirección de Joseph D. Clinton.

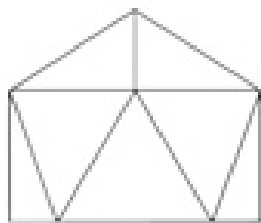
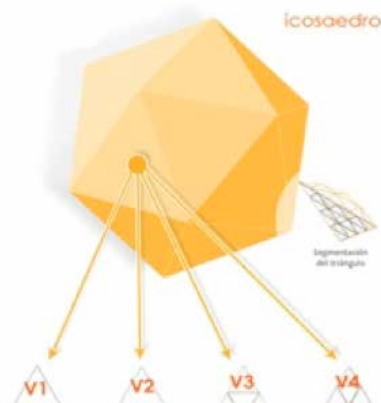
Su estudio, que se desarrolló entre 1964 y 1971, fue patrocinado por la NASA, que veía en ese tipo de estructuras posibles aplicaciones para futuras misiones espaciales.

Como resultado, Clinton publicó varios métodos aplicables a cualquier poliedro de caras triangulares, con lo que se generalizó el procedimiento para incluir otros poliedros distintos al icosaedro.

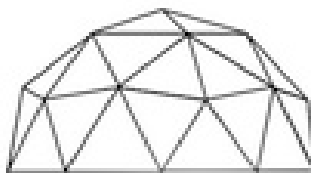
Para comprender el sistema utilizado, fijémonos en la figura de la derecha, en la que se observa un icosaedro en el que generamos subdivisiones en sus caras. En función del número de subdivisiones de las caras del icosaedro (a lo que denominamos frecuencia), podemos obtener más o menos densidad superficial (de barras o triángulos).



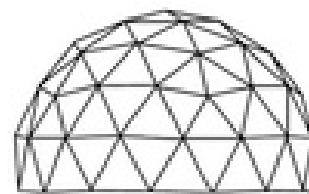
La esfera así generada se convierte en una cúpula mediante el corte adecuado respecto al diámetro de la esfera; podemos realizarlo en su mitad o bien más abajo, por ejemplo a tres cuartas partes o, como es más habitual, a 5/8 del diámetro de la esfera, para así lograr más volumen, altura, visibilidad y aspecto esférico desde visión remota.



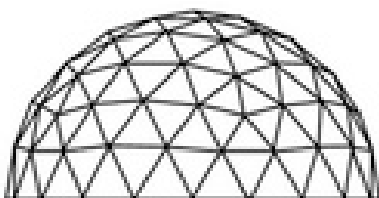
Frecuencia V1



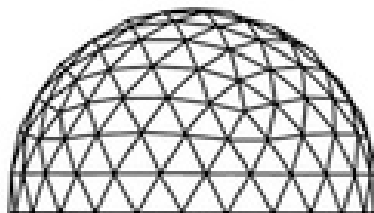
Frecuencia V2



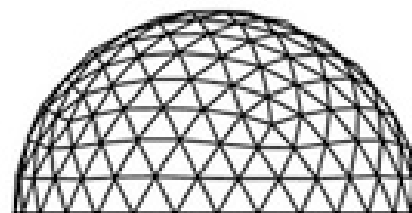
Frecuencia V3



Frecuencia V4



Frecuencia V5



Frecuencia V6



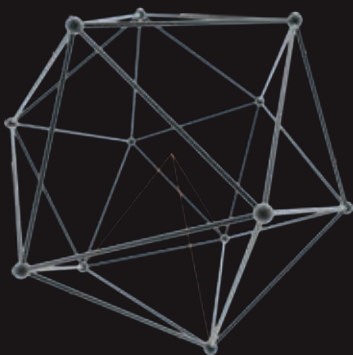
01 configuración sp^3
del átomo de carbono



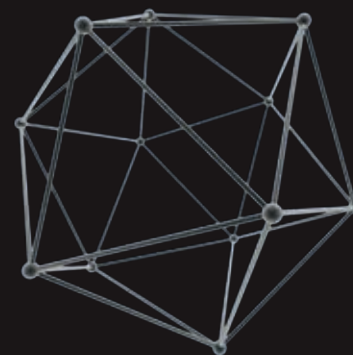
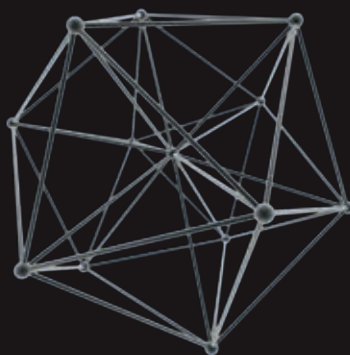
02 geometría tetraédrica



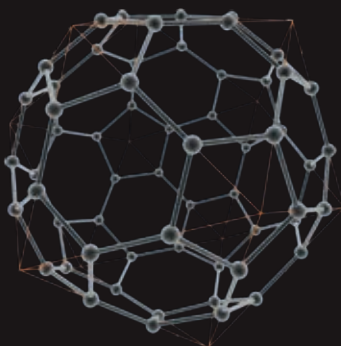
03 tetraedro



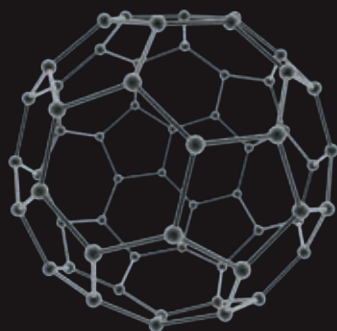
04 icosaedro obtenido conectando 20 tetraedros por uno de sus vértices



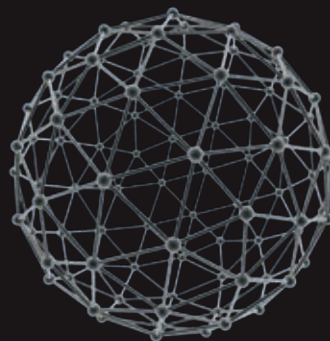
05 geometría icosaédrica



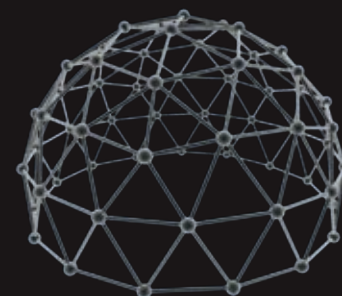
06 truncado de sus vértices
a 1/3 de cada arista



07 icosaedro truncado / fullereno



08 triangulación de sus caras:
esfera geodésica TLS

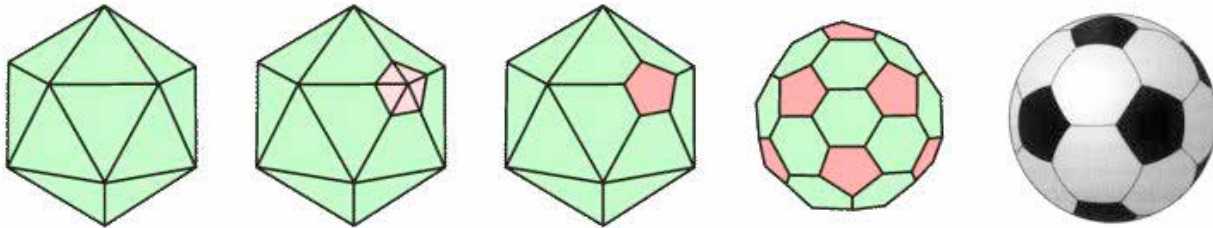


09 corte a 5/8 de su diámetro:
cúpula geodésica DOME'UP®

un encuentro prodigioso

Es en este punto donde confluyen las dos historias que les he narrado: la del descubrimiento del fullereno y la del estudio de sólidos geométricos, que como habrá comprobado el lector incluye las bases del diseño de cúpulas geodésicas.

Expliqué que una de las estrategias para construir un fullereno consiste en partir de un icosaedro (ya saben, formado por veinte tetraedros conectados por un solo vértice ubicado en su centro) al que truncamos (cortamos) sus vértices, seccionándolos hasta extraer de su volumen doce pirámides de base pentagonal. Ese corte se debe producir a un tercio de la longitud de cada arista:



Como se observa, el truncado de un icosaedro (20 caras triangulares, 12 vértices, 30 aristas) genera un nuevo poliedro de 32 caras (12 pentágonos y 20 hexágonos), 60 vértices y 90 aristas; es decir, un fullereno o buchyball. Pasamos de una esfericidad (calculada comparando el volumen que llena la esfera circunscrita, o sea, la que pasa por todos sus vértices) del 61 % al 87 %; es decir, el fullereno es mucho más esférico que el icosaedro: incrementamos su esfericidad en un 43 %.

En el icosaedro y en el fullereno todas las aristas son de la misma longitud, mientras que las conexiones de las aristas –es decir, los vértices– del icosaedro son iguales (conectores de cinco vías); en el caso del fullereno usamos dos tipos de conectores: aunque ambos son de tres vías, ofrecen angulaciones distintas, pues han de generar hexágonos y pentágonos, que como sabemos tienen distinta angulación interna (60 grados los hexágonos, 72 grados los pentágonos).

Ahora imagine que, sin conocer nada de lo que hasta ahora ha leído, le entrego los componentes constructivos de un fullereno: le facilitaré 60 conectores o bolas y le pido que intente construir una

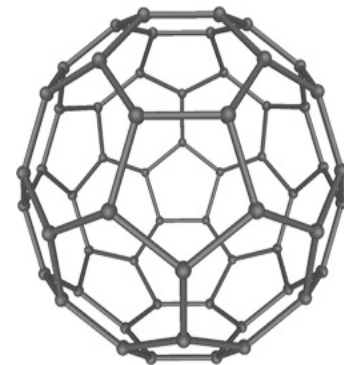


figura cerrada con esos componentes, sin darle más información; los conectores o vértices que le facilito admiten numerosas posibilidades angulares. Ese problema es exactamente al que se enfrentaron Kroto, Curl y Smalley cuando obtuvieron aglomerados o racimos de carbono en la máquina vaporizadora de la Universidad de Rice, allá por 1985, en plena búsqueda de la estructura de una nueva molécula (aún no tenía nombre). No solo no disponían de información suficiente, sino que posiblemente partían de supuestos erróneos o al menos confusos, como es el conocimiento previo (instaurado en la comunidad científica) de que el carbono únicamente se interconecta siguiendo determinadas angulaciones.

El experimento constructivo que les propongo lo pueden hacer cuando deseen, porque la empresa americana Zometool® dispone de un ingenioso kit específico de construcción de fullerenos, en la actualidad por 31 euros; además de la web, lo he visto disponible en algunas jugueterías en nuestro país. Incluye 60 conectores y 90 barritas (esto último supone una gran dosis de información) y unas instrucciones de montaje, algo con que el equipo de Rice no contaba, además de que no sospechaba que se trataba de una forma esférica. Con las instrucciones de ese juego en la mano, un montador no experto (por ejemplo, un niño de 12 años) puede construir la esfera en menos de 60 minutos. Sin las instrucciones, me temo que algo más...



Les propongo que analicemos la información y entorno en el que el premiado equipo de Rice trabajaba.

En primer lugar, imaginen que el acceso a la información previa (por ejemplo, los estudios de Osawa sobre el cornuellene) no era ni mucho menos sencillo. De hecho supongo que sus estudios eran desconocidos para ellos, para empezar porque la publicación se hizo en japonés y no se tradujo al inglés para su indexación internacional.

En esos tiempos no tenían acceso a información remota, a no ser que fuera relevante y estuviera publicada en revistas de alto impacto y/o difusión a nivel internacional. Recordemos que no existía internet y que el acceso a redes de búsqueda vía satélite no se consiguió –de forma estable y asequible– hasta varios años después. De eso puedo dar fe, porque mientras trabajaba en un CIM (centro de información de medicamentos) en España en los años 90, teníamos tres dificultades para obtener información: el generador de la misma no siempre tenía acceso a su publicación en bases de datos consultables y en el formato requerido, la indexación estaba limitada (lo que dificultaba su detección) y el presupuesto era limitado, ya que para acceder se pagaba por tiempo de conexión.

Además, el equipo de Kroto, Smalley Curl no tenía las herramientas de diseño asistido de que disponemos en la actualidad, por lo que imagino que los esquemas formales se habrían de realizar a mano alzada.

Pero el equipo disponía de un dato importante: la figura a crear no tenía bordes libres; es decir, se debería tratar de una figura cerrada, por tanto un poliedro, dada su baja reactividad y que no había más que un tipo de átomos en el reactor. Pero algunas de los carbonos podrían estar dentro del poliedro, por lo que esa información no era del todo relevante.

Vuelvo a referirme al sueño de Kekulé, cuando se enfrentó a la obtención de la estructura del benceno: soñó e interpretó para encontrar solución a un problema que llevaba decenios sin resolverse.

Pues bien, fue Smalley quien afortunadamente recuperó milagrosamente, de su memoria visual, la cúpula geodésica que construyeron Fuller y Sadao para la exposición Universal de Montreal, allá por 1967, muestra a la que asistió. Imagino su despacho lleno de propuestas, las reuniones del equipo para discutir las posibilidades y, por qué no, el instante en el que encontraron la forma de conectar de forma estable los 60 átomos (supongo que usarían un modelo de bolas y palos) para identificar la figura mágica del fullereno, que en realidad se correspondía con el ya conocido icosaedro truncado. ¡Un premio Nobel merecido!

Pero en esta historia que les narro no todo han sido luces. Por ejemplo, M. Mallo refiere el extraño lag de información entre la construcción de la primer cúpula geodésica, patentada en Alemania en 1925 con el número 415395, y la de Fuller, rebautizada y vuelta a patentar más tarde por él mismo en los años 60.

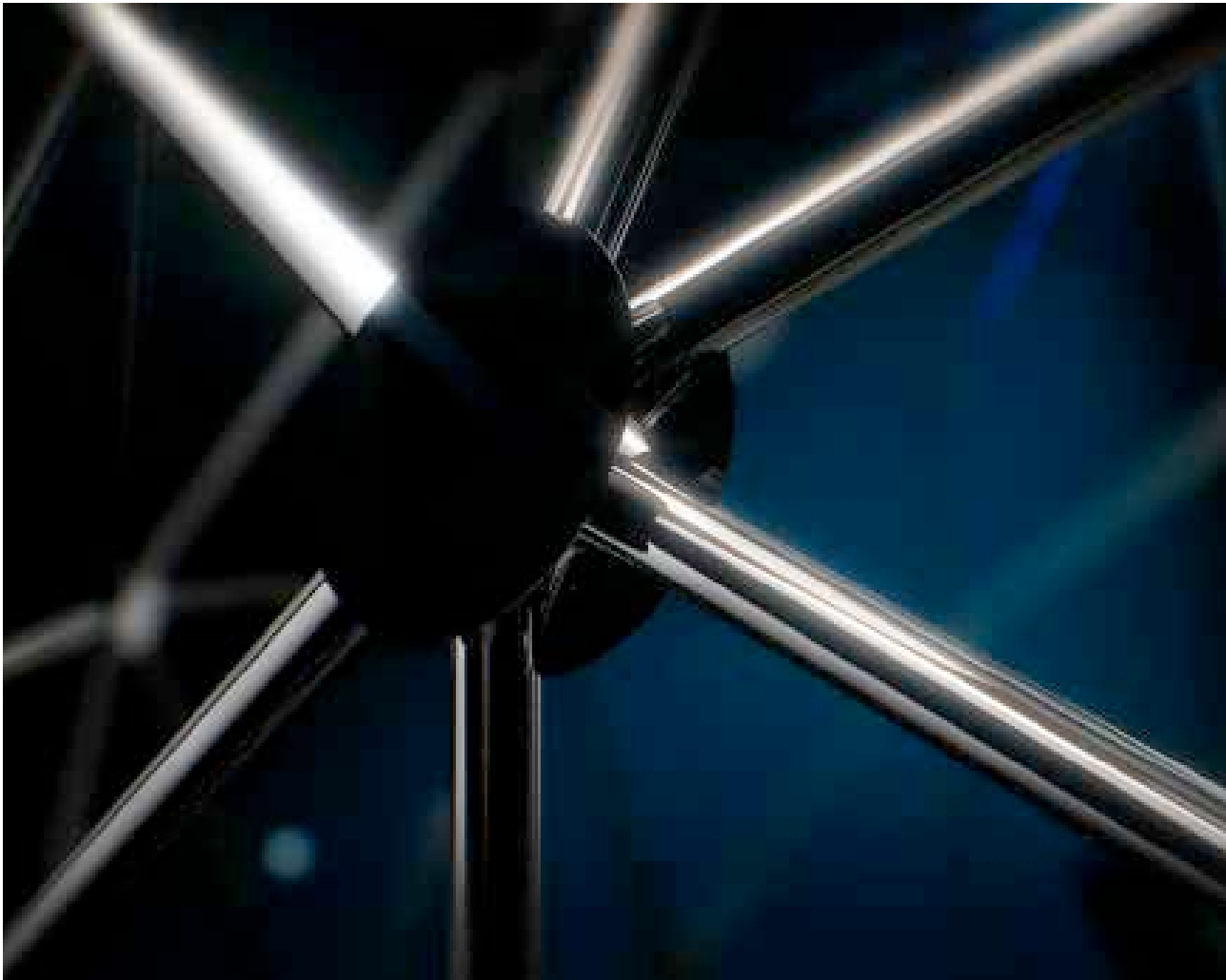
En una carta escrita en 1973 por el doctor Degenhard (ingeniero de Zeiss) a Shelter Publications se explica cómo las patentes alemanas desaparecen después de la Segunda Guerra Mundial, incluso asegura que, desde Estados Unidos, la construcción del planetario era conocida entre los interesados en este tipo de geometrías:

"Todas las fichas y patentes se las llevaron las tropas americanas o rusas cuando ocuparon Jena en 1945. (...) Sobre el primer planetario de proyección se escribió bastante. Comoquiera que algunos de los experimentos precedentes se habían realizado en los USA, tengo la seguridad de que quienes se interesaban desde allí conocieron los logros de Zeiss en 1922".

También llama la atención el desconocimiento de los estudios de Osawa sobre el cornuallene por el equipo de Rice, y algo que a mí particularmente me extraña: que desde el equipo no se hagan referencias al teorema de Euler cuando se plantearon la estructura del C₆₀.

Hemos visto que para conseguir generar una forma esférica resuelta con nodos y barras estructurales (la llamamos geodésica) completamente cerrada, se hubo de hacer un gran esfuerzo de imaginación y que lo hicieron, por este orden: el equipo del Dr. Bauersfeld en Jena (1922), el despacho de Fuller en Geodesics Inc (1951), Eiji Osawa en la Toyahashy University of Technology de Japón (1970) y el grupo británico/americano de la Universidad de Rice (1985). Llegaron a la misma conclusión: para generar una forma esférica utilizando hexágonos regulares es imprescindible intercalar pentágonos en su malla. Les remito a las dos imágenes de la página 20, que describen cómo es imprescindible intercalar pentágonos en una red de hexágonos para lograr curvar esféricamente, es decir, en las dos dimensiones, una lámina. Y todo ello –me permito insistir– con base en el teorema del matemático suizo Euler.

En el capítulo correspondiente les expondré los criterios principales que habitualmente se siguen en la práctica clásica de la construcción geodésica, que por cierto van más allá de meros criterios de diseño estructural; antes les expondré someramente el acercamiento desde nuestro estudio al diseño de formas geométricas y en particular a la triangulación espacial, que evidentemente incluye la geodesia.



capítulo II

pensamiento triangular

Intentaré explicar, en este capítulo y con ejemplos referidos en las realizaciones de mi propio estudio, el significado de este extraño concepto de pensamiento triangular.

Cuando alguien me pregunta a qué se dedican los artistas plásticos suelo responder que, en resumen, empleamos nuestra energía, conocimientos, tiempo y esfuerzo en hacer "cosas", refiriéndome a su acepción objetual y/o fabril, ya que en realidad elaboramos objetos. Además, los que nos empleamos en ese ámbito que se ha quedado en denominar "arte conceptual" intentamos asociar a esas cosas (objetos) un significado muchas veces ajeno a su configuración estrictamente formal o material, de suerte que el mensaje que deseamos comunicar trascienda más allá de la forma apreciable de la obra.

A la postre, creamos formas concretas, objetos plausibles, creaciones plásticas, aunque muchas veces sean solo digitales, y siempre sujetas a las dimensiones espaciales (dos o tres). Es decir, los artistas plásticos nos hemos de someter a las reglas del espacio, del lugar (del latín locus y localis): forma, localización, ubicación, posición, situación, distribución, delimitación...

Me apasiona el concepto de la disposición espacial (en todas sus acepciones) desde que tengo uso de razón; la ubicación, la interrelación y el movimiento de los objetos en relación con la percepción. Por eso me aproximé desde bien pequeño al arte geométrico, del que en nuestro país tenemos grandes creadores.



Me gustan las obras múltiples; es decir, las constituidas por numerosas piezas y, en particular, las que muestran conexión entre ellas: los ensamblajes. Las piezas pueden estar unidas por simple proximidad o de forma sólida (por ejemplo, mediante soldado); también por tracción o por tensión, o por combinaciones de ellas.

La tensegridad es un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados conectados por compresión, que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente se trata de barras o elementos lineales) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes traccionados (habitualmente cables), que son los que delimitan espacialmente dicho sistema.

El concepto fue acuñado por Fuller, aunque es justo advertir que las estructuras estabilizadas por pretensión fueron concebidas inicialmente por el artista Kenneth Snelson. En sus elegantes esculturas, los elementos que trabajan en tracción son distintos de los que trabajan en compresión.

Antes de que este tipo de estructura se someta a una fuerza externa, todos los elementos que la constituyen están pretensados, en tracción o en compresión.

Dentro de la estructura, las barras rígidas en compresión ejercen una fuerza de tracción sobre los elementos elásticos en tracción que a su vez comprimen las barras rígidas. Estas fuerzas opuestas se equilibran en el conjunto de la estructura y la estabilizan.

La tensegridad nos permite generar obras finales muy interesantes y relacionadas con la vida. Por ejemplo, el sistema de tendones, huesos y músculos de los mamíferos es el mejor ejemplo de funcionamiento a tensegridad.

Una de las primeras obras que realicé con una clara intencionalidad espacial la titulé *Apariencias*.

La obra, resuelta en material pictórico (cosidos y pintura sobre tela) pretendía mostrar las gotas que se pueden observar en la lluvia.

Me llamaba la atención un paradigma que escuché: cuando llueve, nunca caen dos gotas de agua en el mismo lugar. Entonces imaginé una regla de oro para la lluvia: para que así fuera, las gotas (como si tuvieran voluntad o estuvieran sometidas a un orden preciso y determinado) habrían de estar conectadas o informadas –de alguna forma– entre sí. Y asocié a la obra el texto que transcribo:

¿Caída libre, aleatoria, sin ritmo?

No. Otto me explicó que las gotas de agua no caen de forma casual, sin concierto ni medida.

La lluvia parece una descarga desordenada, pero en realidad sigue una elegante secuencia, en la que cada gota tiene su posición y su tiempo. Por eso nunca caen dos gotas en el mismo lugar, como si cada gota respetara a su compañera de viaje.

A poco que te esfuerces –en un atardecer lluvioso sesgado por un rayo de sol– percibirás fugazmente los finos hilos que conectan la sinfonía de agua. Si no es así percibirás, a lo sumo, el arco iris...”



En el soporte de tela, las figuras con forma de gotas de agua estaban conectadas con finos hilos de acero, intentando representar esa sublime conexión.



En el texto aparece Otto, un personaje que creé unos años antes, una especie de Pepito Grillo particular. La denominación de ese personaje tiene que ver con la geometría: está integrado por dos círculos y dos cruces, dispone de dos ejes de simetría (horizontal y vertical) y se lee igual en los dos sentidos. Podrán observar más adelante que volvió a aparecer en otra de mis obras.

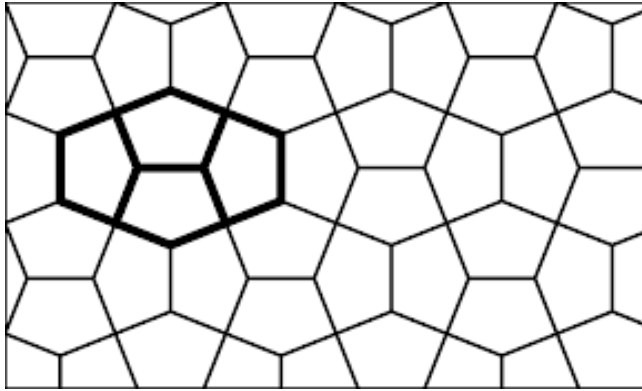
Desde el año 2003 he repetido varias veces la obra *Apariencias* en diferentes versiones, hoy día ubicadas en colecciones particulares (colecciones JD & AC, YASZ y MDL) en España e Inglaterra. La primera vez que las expuse fue en el año 2004 en una exhibición denominada "Indicios" en el Colegio de Arquitectos de Cáceres.

Paradójicamente, "Indicios" pretendía discutir el pensamiento global como instaurador de comportamientos sometidos a patrones, cuando en realidad esta propuesta presupuso la introducción de patrones espaciales, aun cuando se percibieran como aleatorios. Por cierto, patrones utópicos.

A finales de los 90 inicié la serie *Constelación Cartesiana*. Se trata de un paseo por el conceptualismo existencial, a partir de la consideración de que deben existir otras realidades no menos ciertas que las que percibimos con nuestros sentidos y con la aplicación de los conocimientos actuales: trataba de evidenciar que desde la simple observación a la aplicación de las más flamantes teorías –incluso basadas en axiomas indiscutibles de la ciencia– todo transcurre como una forma o versión de entender la realidad, por tanto compatible con otras posibles realidades. Una idea hoy día muy de moda, pero que llevó a la hoguera a Giordano Bruno, en la Roma de 1600.

La belleza y elegancia de la Teoría de las Cuerdas –que asomó al mundo de la física a finales de los 70– supuso la base argumental a esta incursión que me permitió divagar sobre sus consecuencias: esquemas cartesianos casi infantiles frente al peso del devenir desconocido, quizás por descubrir. La complejidad de la realización frente a la simpleza del argumento.

Para realizar esta serie (que comencé en 2001 y he ido extendiendo durante más de un decenio), combinaba la simetría pentagonal con la cuadrangular. Les resumo el problema inicial: se trataba de "teselar" (llenar el plano) con figuras pentagonales, en esta obra estrellas de cinco puntas. La teselación pentagonal es posible siempre que no se trate de pentágonos regulares y que la figura de repetición se convierta, en realidad, en un triángulo, un cuadrado o un hexágono.



Históricamente, a esa teselación se la denomina "teselación de El Cairo", porque aparece frecuentemente en las calles de El Cairo, Egipto, en pavimentos y en murales de arte islámico.

La idea era plasmar un sueño infantil que partía de esa imagen que muchos observamos de pequeños, cuando consultamos en los atlas las constelaciones de estrellas: las agrupaciones se suelen mostrar con las estrellas unidas entre sí por líneas. A esa colección la asocié el siguiente texto:

DE PEQUEÑOS

pensamos que las estrellas están suspendidas del cielo gracias a una fina malla de hilos de plata.

Y que podemos ir de una estrella a otra por esos finos hilos.

Y así es posible enviar mensajes a todos los confines del universo, de estrella en estrella.

Detrás de ese manto, otro espacio diferente, una realidad distinta, más allá de las estrellas.

Los científicos ponen nombres a algunos grupos de estrellas, que por proximidad configuran figuras caprichosas; a estos los denominan CONSTELACIONES.

LA CIENCIA

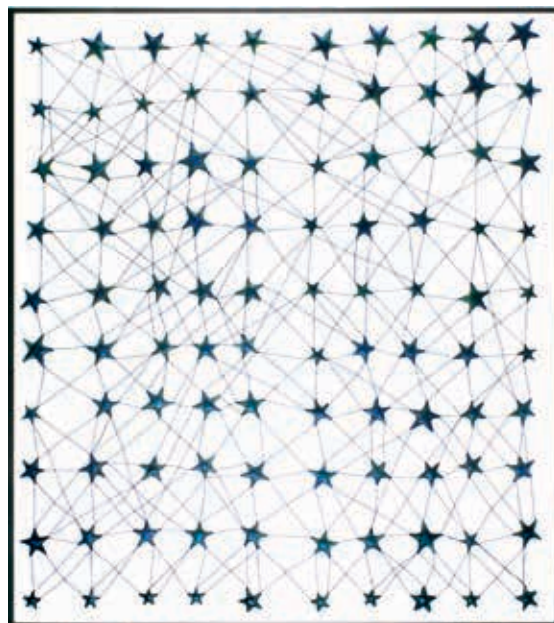
necesita del esfuerzo de abstracción que nos permite asimilar los hechos infinitos como realidades concretas, para así intentar comprenderlas.

Aún así, sería imposible sin absurdos planteamientos, sin propuestas que parecen, a priori, carecer de sentido.

Crecemos encontrando respuestas que rompen el frágil esquema cartesiano que -pensábamos- nos permitía evolucionar con seguridad.

La estrategia de diseño, respecto a la construcción formal de la obra final, era generar una lámina bidimensional integrada por figuras tensionadas sobre el plano y ordenadas en una disposición cartesiana; es decir, una matriz cuadrangular, utilizando como icono o figura de repetición una estrella de cinco puntas; con esta técnica presenté un cuadro en 2001, que pronto pasó a propiedad de la Universidad de Extremadura.





Constelación Cartesina II (2001) / 230 x 205 cm
tela tensionada sobre bastidor de madera

La estrategia constructiva formal partía de una paradoja: cómo conseguir una ordenación cuadrangular utilizando simetría pentagonal. Para ello operé con una técnica tan sencilla como tratar las figuras de tela (estrellas de tejido de algodón rellenas) con resinas hasta obtener una cierta rigidez. De esa forma podía tensionar las figuras y establecer una malla de triangulación, que se estabilizaba tensionando, a su vez, la malla contra un bastidor rígido.



Constelación cartesiana (2001) 300 x 100 cm / colección particular TC

En realidad, la primera obra de esta colección la confeccioné sobre grandes soportes de tela en forma de cojín, utilizando resinas y pigmentos naturales; sin embargo, todas las obras posteriores de esta colección ya las realicé usando este otro sistema de tensionado en el espacio con estrellas de cinco puntas. Empecé a utilizar bastidores perimétricos de acero inoxidable para mejorar el sistema de tensionado y comencé a usar hilos más rígidos, como el Dynema® y el filamento de acero.



CONSTELACIÓN CARTESIANA V.a (2008)
de un total de 5 piezas de 132 x 101 cm
Técnica mixta sobre tela, hilo de Dynema® y de acero recubierto de nylon
sobre doble marco perimétrico de acero inoxidable pulido

En el año 2009 se le ocurrió a Abdón Moreno, director del Departamento de Sagrada Escritura del Seminario Metropolitano (Extremadura), profesor y conocido literato, que ensambláramos tres piezas pictóricas (dos de ellas de la colección Constelación cartesiana) para la exposición "Pablo, ayer y hoy", celebrada en el Claustro de la Catedral de Badajoz con motivo del año Jubilar Paulino, en 2005; la obra disponía ahora de nuevos significados.



Pneuma y Caritma / 365 x 101 cm (AD)

En el año 2010, dentro del evento URBAN SCREENS, celebrado en Cáceres, montamos, en el muro del espacio cacereño de arte y acción Belle Art, una gran instalación con estrellas tensionadas, de tamaño final 570 x 240 cm.

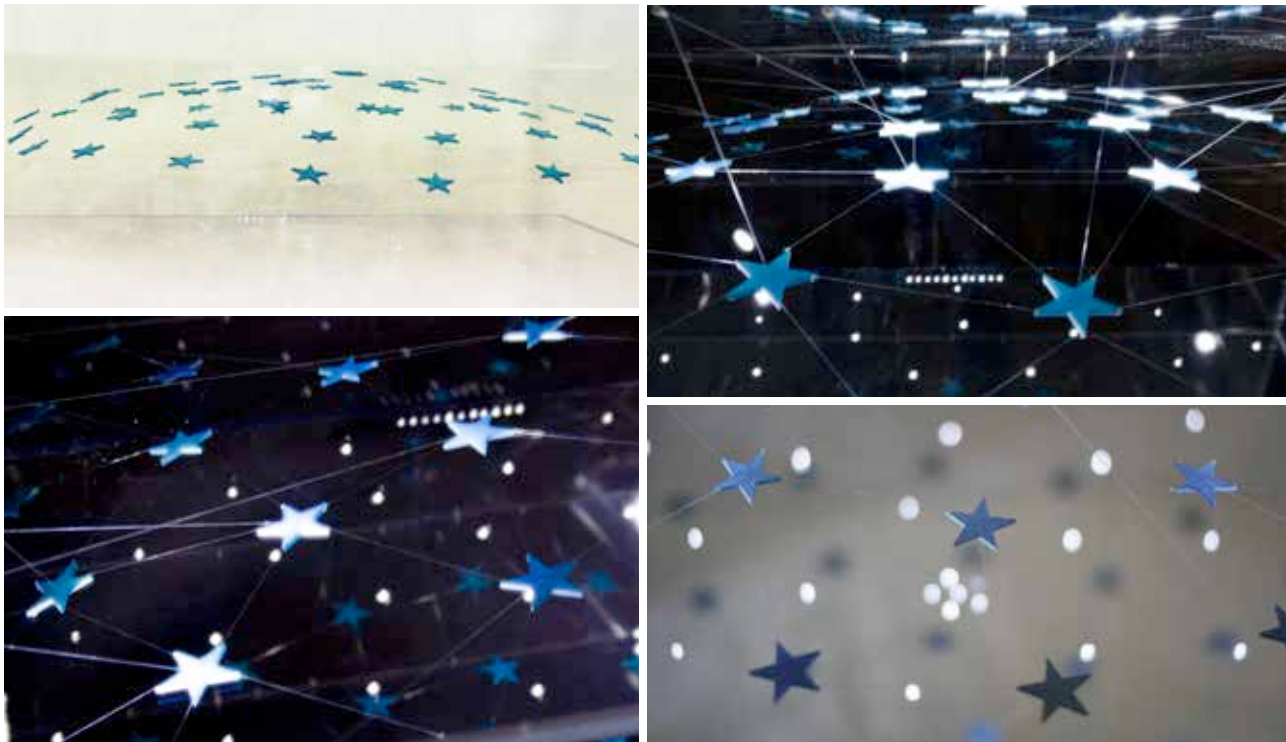


(fotografía AC)

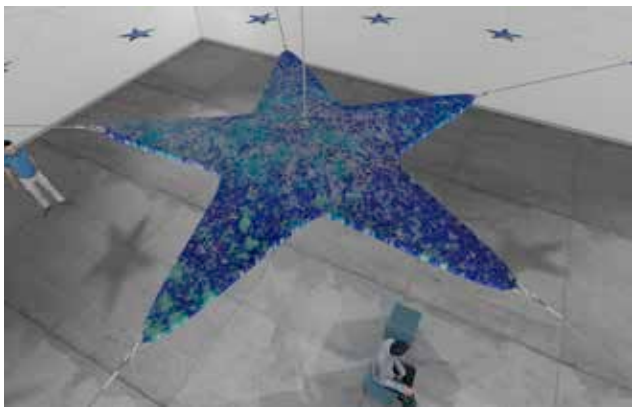
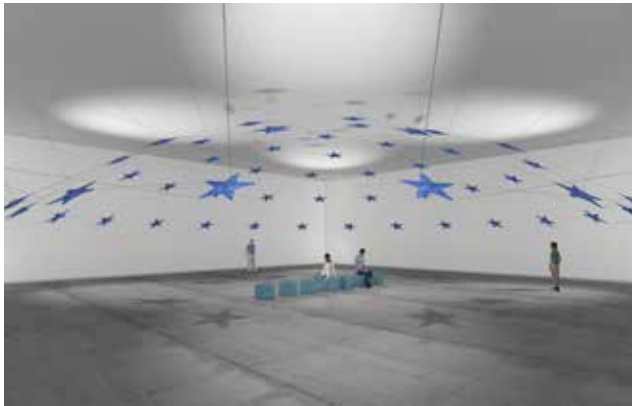
La exposición se denominó Starry Dome y en ella colaboramos el diseñador Luis Manuel López y yo; presentamos varias obras que incluían pintura, escultura, vídeo e instalaciones; de entre ellas destacaba una maqueta de una cúpula elaborada con estrellas de cinco puntas resuelta mediante tensores. La maqueta representaba un diseño a ejecutar en un gran habitáculo de 20 x 20 x 6 metros; incluía numerosas piezas en forma de estrella de 5 puntas, ensambladas con 100 hilos de acero, ancladas a muro con 56 tensores del mismo material.

Fue con motivo de esta obra (Starry Dome) cuando Luis Manuel y yo comenzamos a trabajar con estructuras basadas en la tensegridad (integridad tensional) y mallado estructural; pasamos del plano bidimensional a trabajar con estructuras tridimensionales curvadas y/o esféricas.

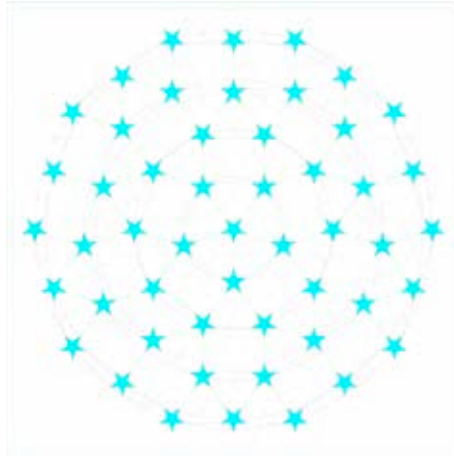
Para ensamblar los 51 elementos tensionados, Luis Manuel diseñó una trama reiterativa basada en pentágonos regulares, en la que se insertan (para teselar completamente el plano) poliedros regulares romboides, de cuatro lados. La figura así generada nos permitía ubicar espacialmente las estrellas siguiendo un patrón lógico, de forma que, una vez atirantadas contra techo y muro perimétrico, obteníamos una forma cupular o geodésica.



maqueta de la cúpula Starry Dome, realizada con metacrilato y fibra óptica (AD)



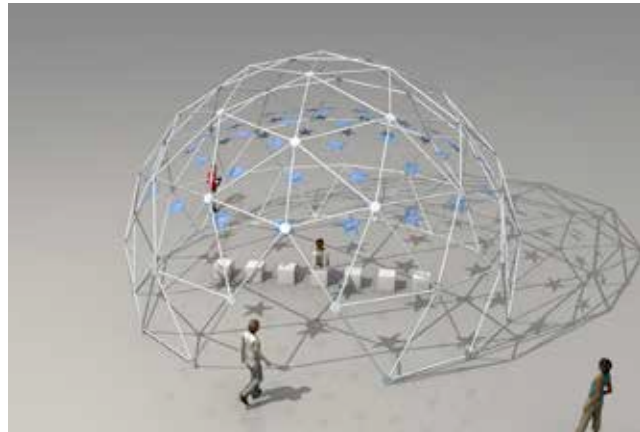
infografías de la obra *Starry Dome* (LM)
instalación en una sala de 20 x 20 x 6 m de una estructura de 51 piezas tensionadas en forma de cúpula



distribución teselar de las piezas en Starry Dome (LM)

La obra Starry Dome nos permitió explorar sistemas de tensegridad (integridad tensional) en tres dimensiones; puede que este fuera el inicio del desarrollo de formas más complejas, como nuestras cúpulas geodésicas DOME'UP.

Años después proyectamos instalar Starry Dome dentro de una de nuestras cúpulas geodésicas, utilizando los nodos de su estructura como soportes de los tensores de las estrellas.



infografía (LM)

Volviendo al título de este capítulo, cuando nos referimos a "pensamiento triangular" hablamos de una concepción espacial que abandona la habitual visión diédrica con ángulos de 90 grados hacia otra basada en triángulos (o angulaciones triangulares) tridimensionales, evidentemente con ángulos distintos a los cuadrangulares a 90 grados. Efectivamente supone un esfuerzo de abstracción, pero nos permite generar todas las formas posibles, descomponiendo tanto la piel superficial como el armazón interno de los objetos, usando la triangulación geométrica como sistema constructivo.

Nuestra primera base conceptual fue el tetraedro: una figura muy estable, indeformable y utilizable (con verdadera dificultad) en la generación de casi todas las formas espaciales. El principal problema de trabajar con tetraedros reside en su ángulo diedro (algo más de 70 grados) que le convierte en inapilable, lo que afecta drásticamente a su usabilidad.

En el año 2008 realizamos en mi estudio (aún no se denominaba a+i+d) la obra "El anillo de Schödinger", un complejo ensayo basado en una historia de ficción que nos serviría de base argumental. La obra abordaba un conjunto de conceptos interrelacionados y descritos a modo de ensayo, con contenidos plásticos (escultura, infografía, fotografía, vídeo, música y narración), acerca de la comunicación de los descubrimientos serendípicos en la ciencia; en realidad y al margen de esa base argumental, la carga estética giraba en torno a la simetría del tetraedro y de su dificultoso uso en la generación de formas funcionales y/o estéticas.



Para ello acudí, en primer lugar, a solicitar la ayuda de dos ingenieros, Miguel Ángel Sánchez Javier y José Manuel Fuentes Campo, con quienes logré un sistema de ensamblaje lógico y estable de numerosas figuras en forma de tetraedro regular.

Lo siguiente fue configurar el equipo de trabajo, que quedó integrado por el fotógrafo Pedro Casero, el músico Arni Giraldo, la física del espacio y escritora Laura Morala y el diseñador y video creador Luis Fano. Además se incorporó, implementando un impactante texto, el prestigioso crítico de arte Javier Cano Ramos, así como Daniel Almoril (filmación). En realidad nos comportamos como un grupo de amigos con un objetivo común, cual fue sacar adelante el ambicioso proyecto, generando un todo armónico y perceptible como conjunto.



el profesor Schödinger, la cubierta del catálogo y uno de los manuscritos encontrados (PC y LF)

El argumento de la obra El anillo de Schödinger comenzaba con el hallazgo casual de unos manuscritos atribuidos al profesor Otto Schödinger, un –supuesto– científico checo que cuando falleció estaba fabricando un artilugio que, de haber funcionado, habría generado lo que hoy día se conoce como un “agujero negro”, con fatales resultados, por cierto. Laura se encargó de generar un entorno argumental impecable, yo fabriqué el núcleo central de ese artilugio (dos anillos toroides de 60 y 120 tetraedros) y entre todos logramos superar numerosas dificultades técnicas para generar una obra de elevada carga conceptual, que estuvo itinerando en exhibiciones por el suroeste español y Portugal.



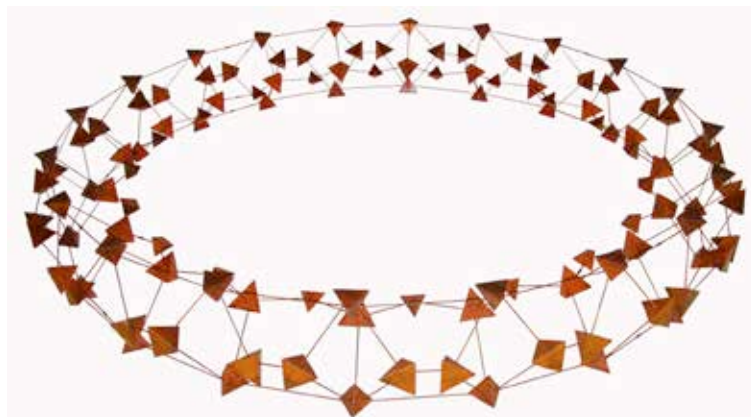
fotografías del proyecto (AD y PC) e infografía (LF)

El magnífico catálogo editado (impreso por Indugrafic) contenía todas las realizaciones del proyecto e incluyó numerosos textos descriptivos no solo de la obra en sí sino del desarrollo de la misma a lo largo de su ejecución.

En el epílogo del catálogo incluimos dos apartados, uno se refería a los parámetros constructivos de los anillos tóricos creados en forma de escultura; el otro tenía el sugerente título de “Usos y desusos de la figura del tetraedro a lo largo de la historia”.

En el primer apartado explicábamos cómo logramos cerrar un anillo tórico de 120 tetraedros de forma exacta, soldando los mismos con varillas de acero y utilizando una estrategia basada en la tenseguridad.

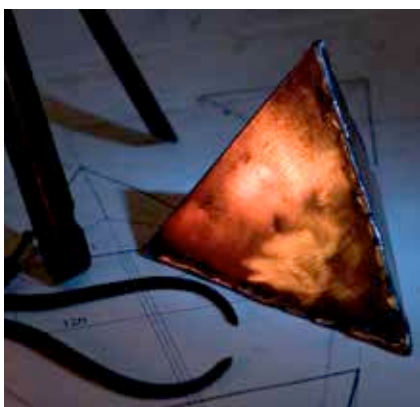
El diseño de los anillos fue complejo y su fábrica implicó desarrollar previamente una estrategia constructiva basada en el uso de varias matrices de soldadura, tanto para obtener los tetraedros sólidos (fabricamos más de 300) como para lograr posicionar y soldar cada elemento en su lugar exacto, de forma que el propio proceso de soldadura no generara deformaciones; además hubimos de plantear un sistema de desmontaje que permitiera el transporte e instalación del artefacto creado.



escultura "El anillo de Schödinger" diam. 340 cm / fotografía PC

Y durante todo el proceso, tuvimos que aplicar generosamente ese "pensamiento triangular" al que me refería: cómo obtener, mediante ensamblaje de numerosas figuras angulosas como el tetraedro y varillas rectilíneas, una forma curvilínea, en este caso un toro o "donut".

El personaje de ficción que creamos para esta obra se llamaba Otto Schödinger. Le pusimos de nombre Otto por las razones que les indiqué hace unos párrafos; el apellido Schödinger buscaba un evidente parecido con el del conocido físico austríaco Erwin Rudolf Schrödinger, de forma que si alguien "googleaba" el nombre de nuestro profesor checo, el buscador le conduciría al universo de la física cuántica.



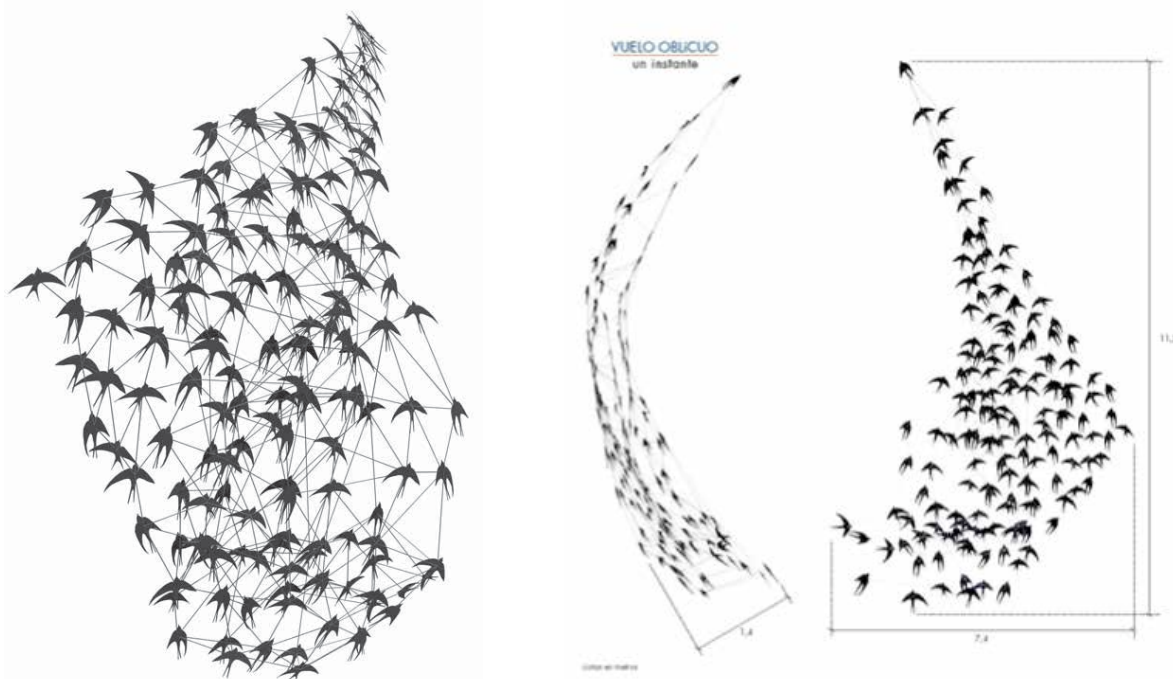
fabricando el anillo (fotografía de PC) y fotografías posteriores de PJ

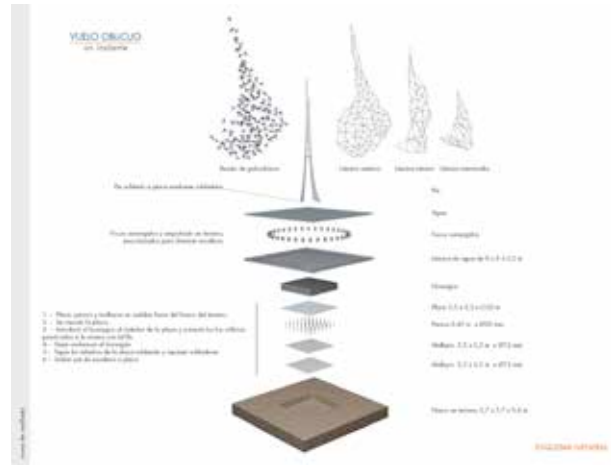
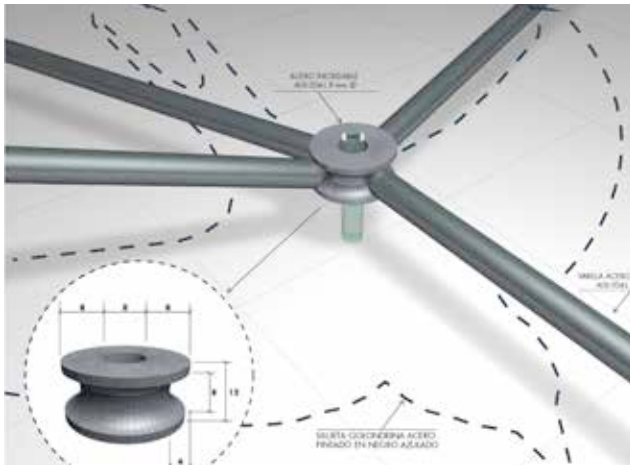
Éste nuestro personaje trascendió a otra obra literaria: el revisor de este texto, el profesor y literato leonés Demetrio Fernández González lo incluye en su novela (o *nowwwela* o *nowebla*, como él la llama) *Sinfonía de Praga*, en la actualidad en proceso de edición.

Fue poco después de la publicación de la obra "El Anillo" cuando tuve la fortuna de conocer a Luis Manuel López. Ambos coincidimos en OGESA, una exitosa empresa de ingeniería y consulting; me acababa de incorporar como consultor externo y recibí el encargo de montar un departamento de comunicación, de suerte que Luis se incorporó a su staff como diseñador; era brillante y eficiente, con una mentalidad directamente encaminada a la búsqueda de resultados y suficiente experiencia en el diseño de soluciones de ingeniería; casi todos los diseños (al menos los gráficos y/o de imagen) de la empresa pasaban por sus manos.

Trabajando juntos en el seno del departamento de OGESA creamos la obra "Vuelo oblicuo", un ejercicio de triangulación geométrica y tensegridad con base argumental en el vuelo de las golondrinas, diseñado para un concurso de obra monumental.

La obra, planteada como una gran escultura, se resolvió como un conjunto de figuras (siluetas de pájaros) insertadas en tres mallas paralelas resueltas por triangulación, de forma que la pieza final, una vez soldada, se podría instalar mediante suspensión o utilizando una esbelta estructura curvada, a modo de peana.



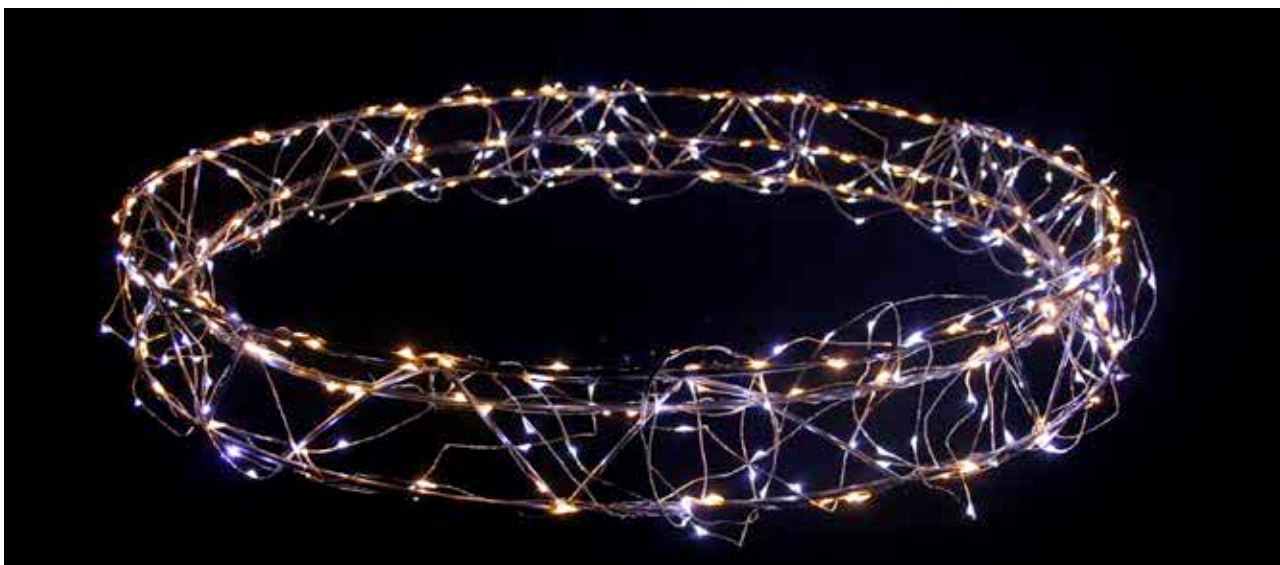


imágenes del diseño constructivo de Vuelo Oblicuo (LM)



infografías de posibles instalaciones de Vuelo Oblicuo (LM)

Tras estos proyectos dispusimos de una cierta "cultura" de triangulación espacial, pero sobre todo de mucha curiosidad y ganas de abordar estructuras más complejas: comenzamos a interesarnos por la geodesia. Mientras trabajábamos en el desarrollo de nuestra propia aventura con el programa que denominamos DOME'UP® (marca registrada por a+i+d), seguimos realizando numerosos proyectos no siempre relacionados con la geometría, aunque también visitamos, y me refiero a mi tándem con Luis Manuel, proyectos creativos que interesan a ámbitos relacionados, como pueden ser las luminarias/esculturas de luz Orionring o el proyecto Signs of Live.

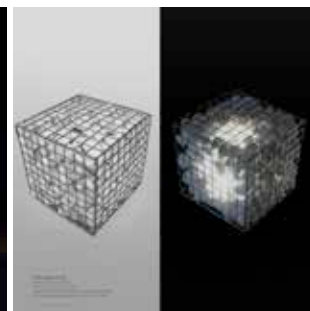


luminaria Orionring, resueltas con una estructura de acero inoxidable tipo trust y microleds (AD)

En el año 2014 comenzamos a trabajar en un atractivo proyecto sobre la proximidad entre la arquitectura y la estética de la vida tal y como la conocemos y las creaciones sintéticas. Las obras que creamos se exhibieron en una exposición titulada "Simply (a)live" (sencillamente vivo) e integraba dos colecciones, una de ellas denominada Drip'on face (goteo gestual), en la que se presentaba una amplia colección de obras resueltas mediante goteo de resinas, y otra colección en la que englobamos numerosas piezas de diferentes materiales; esta segunda colección, que titulamos Signs of life, fue fruto de la colaboración de cuatro autores, pues además de Luis Manuel López también se incorporaron el diseñador Luis Fano y la crítica de arte Rosa Perales.



infografías de luis lópez y dos esculturas de alfonso doncel / Simply(a)live (PJ)



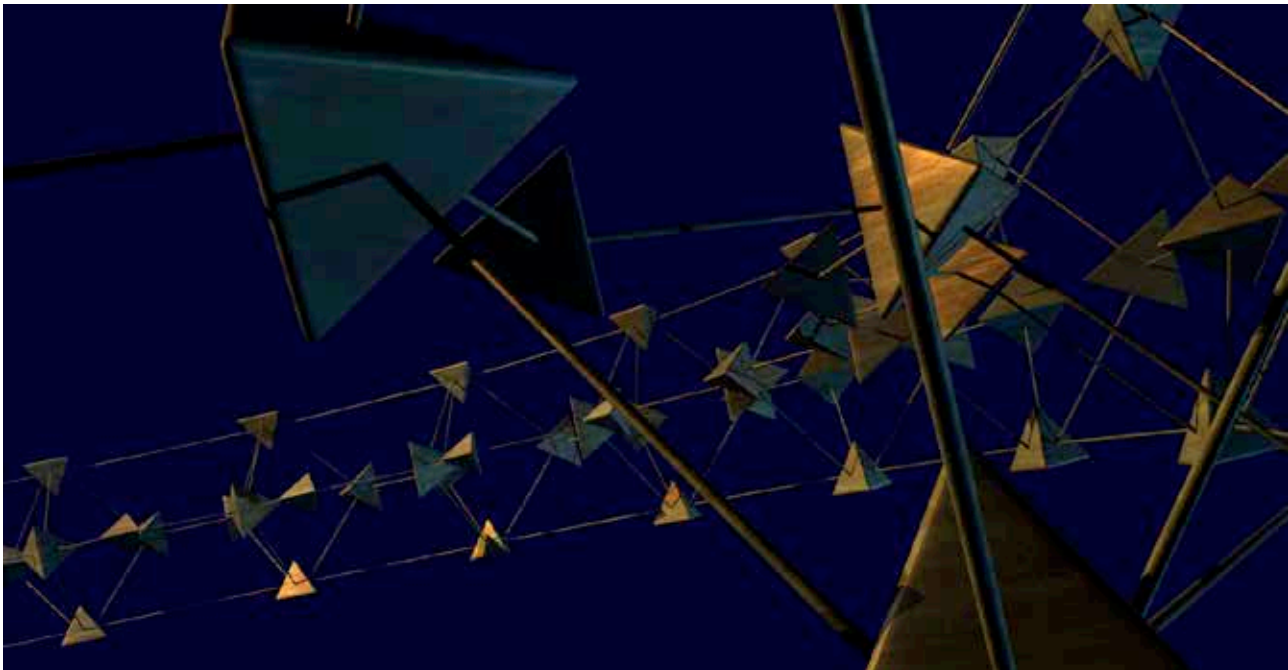
diferentes piezas de la colección simply(a)live: el tótem SofL, la obra Mounds y dos ejemplares de Cube, de alfonso doncel; infografías de luis lópez y la caja de luz Impulse, de luis fano y alfonso doncel

En esta exposición ensayamos sobre aspectos que después hemos continuado en la obra objeto de este documento, "el secreto de la vida": las geometrías y arquitecturas de lo vivo, sus texturas y apariencias, hoy día prácticamente indistinguibles de las artificiales y/o sintéticas. Ese proyecto fue ejecutado de forma impecable y su puesta en escena se realizó en la sede de la Fundación Obra Pía de los Pizarro en Trujillo y, amparada por el Gobierno de Extremadura, en Badajoz.

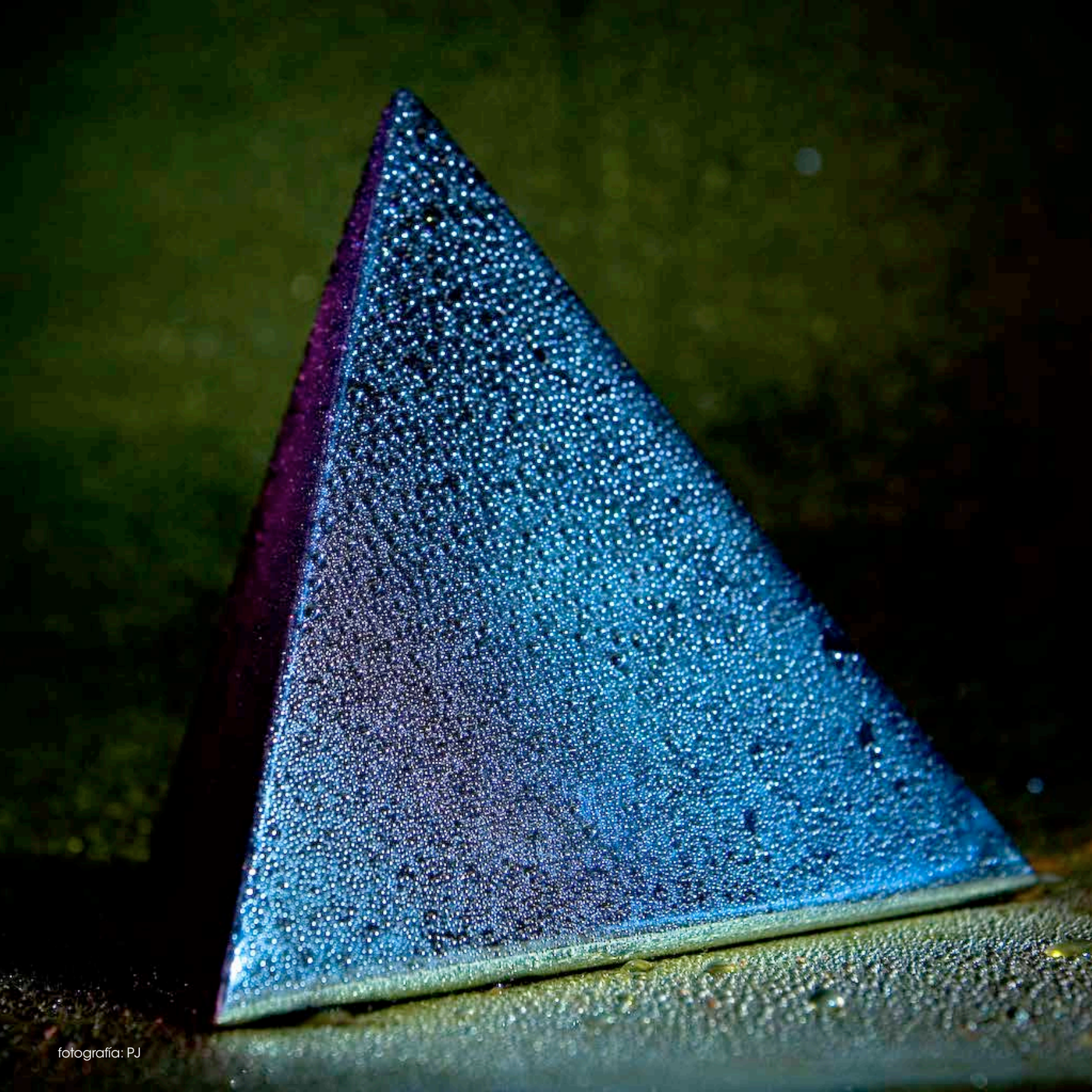
El proyecto que más tiempo y dedicación de medios nos ha ocupado a Luis Manuel y a mi ha sido DOME'UP, una iniciativa de diseño y fabricación de cúpulas geodésicas con finalidad no solo artística, sino también de aplicación en comunicación y arquitectura efímera.

Este proyecto contiene una "spin off" (una derivación) en la que participó Luis Fano, relativa al diseño de estructuras resueltas mediante tensegridad y/o ensamblaje de piezas rectilíneas con destino a mobiliario urbano y arquitectura efímera.

DOME'UP es un programa de diseño de estructuras geodésicas resueltas por triangulación que iniciamos en 2011 y que me temo ocupará nuestro tiempo y energía durante algunos años más, porque la triangulación estructural aplicada a la geodesia se nos antoja... más que apasionante.



El anillo de Schödinger / infografía de luis fano



capítulo III

cúpulas y esferas geodésicas

Es habitual que los diseñadores y, en general, cualquier creativo o investigador que maneje y conviva con conceptos espaciales –como pintores, escultores, arquitectos, ingenieros, físicos, biólogos, etc.– se interese por la geometría. Su atractivo es indudable, como lo demuestra su interés en todas las culturas conocidas. El equilibrio de lo geométrico, su aparente complejidad y la lógica aplicada en la búsqueda de soluciones ejercen un atractivo indudable sobre el ser humano. ¿Pero por qué resulta tan atrayente?

de la belleza de la geometría (y la geodesia)

Han sido muchos los estudiosos de la teoría geometría/belleza, algunos ya citados, como Platón con sus sólidos platónicos, Leonardo da Vinci, Sandro Boticelli con sus estudios de la geometría de la percepción, Fray Luca Pacioli con su proporción divina o Piero della Francesca, junto a Pitágoras, el primer “truncador” del icosaedro y explorador de los principios trigonométricos que ahora nos parecen evidentes; también Aristóteles, para quien la belleza estaba en la simetría; Tomas de Aquino, que postuló que la geometría se encargaba de adaptar la materia a una forma bella; Newton, que postulaba la simetría implícita en sus leyes de la mecánica; o Lagrange y Hamilton, que pusieron de manifiesto esas leyes con una reformulación matemática basada, precisamente, en la simetría. Sin olvidar a Haeckel, D’Arcy Thompson o Frei Otto.

Einstein exigía una bella simetría a sus teoremas y Richard B. Fuller hablaba de belleza en sus estudios sobre la geodesia; podría citar otros muchos más hasta un sinfín de nombres de físicos, matemáticos y filósofos contemporáneos.

Antes que todos ellos, nuestros ancestros utilizaron la geometría como el patrón del que dependían el equilibrio, la armonía y las proporciones; sabemos que las culturas milenarias han admirado la geometría: un ejemplo son las pirámides de las culturas egipcias e incas o la Flor de la Vida de los mandalas orientales, o la belleza de las teselaciones matemáticas y geométricas árabes, presentes de forma patente en la Alhambra de Granada.

Muchos matemáticos expresan el amor por sus trabajos matemáticos describiéndolos (en el todo o en algunos de sus aspectos) como bellos. A veces describen su actividad matemática como una forma de arte o, al menos, como una actividad altamente creativa; son comunes las comparaciones de las matemáticas con la música y la poesía. Bertrand Russell expresa la belleza matemática con estas palabras:

“La matemática posee no solo verdad, sino también belleza suprema; una belleza fría y austera, como aquella de la escultura, sin apelación a ninguna parte de nuestra naturaleza débil, sin los adornos magníficos de la pintura o la música, pero sublime y pura, y capaz de una perfección severa como solo las mejores artes pueden presentar.”

La geometría explora y explota la proporción, el ritmo, la armonía, la simetría, la praxis elegante y la razón; en ella concurren la realidad de la naturaleza y los más altos hallazgos de la mente humana. Puede que en la percepción de esa coincidencia, en esa sublime y oculta relación entre razón y naturaleza radique la poderosa atracción del hombre por la belleza de la geometría.

La ciencia trata de explicar los fenómenos de la naturaleza, junto a otro caminante tímido y silencioso, la estética, que establece una especie de guía de búsqueda de nuevas y poderosas simetrías subyacentes en muchos de los secretos escondidos en la naturaleza. Lo natural es verdadero, es cierto, y por ello queremos comprender sus leyes y aproximarnos con la sensación de la certeza. Parece evidente que al ser humano le agrada la percepción de dos grandes valores, verdad y belleza: ambas le producen sensación de armonía y seguridad.

El neurólogo Semir Zeki localizó la región del cerebro que registra las experiencias de certeza y belleza: cuando son positivas, ambas coinciden en la región orbitofrontal del córtex. Nada es casual. Desde la neurociencia se considera lícito preguntarse por la existencia de los universales artísticos. La base original del conocimiento neuroestético es un sencillo silogismo: la visión depende del cerebro y el arte depende de la visión. Si aceptamos que efectivamente el arte depende de la visión, tendremos que detenernos en este preciso sentido: la vista.

En 1998, Zeki señaló que los artistas eran neurólogos estudiando la mente con técnicas únicas que alcanzaban conclusiones interesantes –aunque poco específicas– sobre la organización del cerebro.

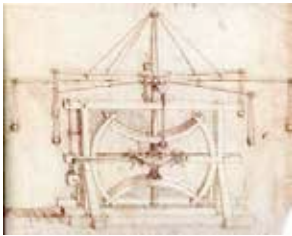
Neurólogos como Zeki y Ramachandrán han sentado con sus investigaciones las bases de una nueva rama del conocimiento científico: la neuroestética. Se trata de conocer qué sucede en el cerebro de un individuo cuando se enfrenta a conceptos estéticos como, por ejemplo, una obra de arte: la creación o la recepción del arte. Y de ahí, la belleza.

Cuando elaboramos la obra “El anillo de Schödinger” estudiamos esa atracción atávica del ser humano por las construcciones geométricas y también –esta más recientemente– por los artificios: la “macchina”. En el artículo *la máquina célibe* del catálogo de la obra, escribí que Umberto Eco asignaba su acuñación a Marcel Duchamp, refiriéndose a máquinas bellas, precisamente bellas por eso mismo: porque carecen de función o tienen funciones absurdas, máquinas de derroche, inútiles, simple arquitectura. También hay belleza en las máquinas diabólicas, como la descrita por Kafka en *La colonia penitenciaria*, con la que el propio verdugo, fascinado, se inmoló a mayor gloria de su creación.

Nuestra obra El Anillo de Schödinger pretendía ser una máquina bella y absurda. Aunque tenía asignada una función (colapsor con capacidad para generar un caótico agujero negro), era palpable que el grupo de autores pretendíamos una función ensayística y estética; recuerdo nuestro empeño en otorgarle una configuración formal acorde con nuestras intenciones. Para empezar era compleja (120 tetraedros conectados entre sí siguiendo un patrón reiterativo),

agresiva (con sus afilados vértices amenazantes) y disponía de un movimiento giratorio que, si la situábamos a la altura de la cabeza, imponía respeto. Su tamaño (unos 3,5 m de diámetro) también se calculó con esas intenciones.

Consideremos "máquina" como un aparato o artificio compuesto de varias partes que interactúan entre sí para ejecutar una determinada tarea, o un conjunto mecánico de cierta complejidad; es decir, que incluye un mecanismo o sistema para operar por sí mismo como un ensamblaje realizado con una lógica finalista o funcional. O bien no: un ensamblaje afuncional o cuya función es, a lo sumo, estrictamente estética: una máquina célibe o absurda.



Traiga el lector a su memoria las máquinas de Leonardo da Vinci, profusamente difundidas en libros y documentales o en numerosas exposiciones, una de ellas en su propia ciudad natal, al norte de la Toscana italiana. Al ser humano le atraen las máquinas, la tecnología (de ahí la vigente profusión de gadgets tecnológicos) y el artificio mecánico. Marcas de vehículos italianas como Ferrari® o Ducati® se vanaglorian de sus elegantes diseños mecánicos y permiten su contemplación al asomarnos a sus motores.

Algunos autores consideran que esa atracción o su consideración como elemento bello se debe a la concurrencia de varios principios. Umberto Eco, en *Historia de la Belleza*, explica que Tomás de Aquino expresaba que además de una adecuada proporción, las obras deben ofrecer integridad; es decir, que cada cosa tenga las partes que le corresponden, claridad (se considera bello lo nítido) y consonancia. Hablaba de la adecuación al fin, poniendo como ejemplo lo absurdo (¿y feo?) de un martillo de cristal; es decir, asignaba una relación "entre la inteligencia y la cosa que la inteligencia comprende".

Otra base conceptual se soporta en la atávica necesidad de la inteligencia humana para comprender: el hombre necesita entender y asumir lo que observa y analizará la máquina o el artificio para entender su configuración y funcionalidad, y en ese camino encuentra placer.

Me he preguntado muchas veces por qué nos resultan tan atractivas las construcciones geodésicas. He confirmado que no solo me ocurre a mí, como demuestra la cantidad de información generada y disponible sobre la materia y la profusión de publicaciones e iniciativas en esta disciplina. Por ejemplo, debido a su indudable impacto y atracción, en todas las grandes exposiciones mundiales (y otros eventos multitudinarios) se presentan creaciones de este tipo o inspiradas en su sistema constructivo.

La geodesia se basa en la generación de formas curvilíneas o esféricas mediante el ensamblaje de elementos rectos; la esfera se considera el cuerpo perfecto, la forma primigenia. Es un contenedor cerrado, un albergue. Y esa forma se obtiene mediante un ensamblaje exacto de múltiples piezas, que han de conectarse de forma lógica y exacta. Cada cosa en su lugar, bien estructurada, un système où tout se tient, generando un todo en el que las partes son observables.

Cuando contemplamos una malla resuelta por interconexión múltiple, buscamos (y en ocasiones encontramos) una lógica de su formación.

Más aún cuando apreciamos otra forma más compleja, como una cúpula o esfera geodésica: establecemos una conversación visual y lógica con la pieza, en busca de una razón que nos permita comprender sus razones o patrones empleados en su construcción; también sobre su estabilidad e integridad: en ese entramado terminamos por instalarnos con comodidad, porque a primera vista “entendemos” que su estructura es estable y equilibrada, que “funciona”. Si está ahí y no se cae será porque está bien hecha. Hay múltiples formas de desequilibrio, pero solo una de alcanzar el equilibrio.

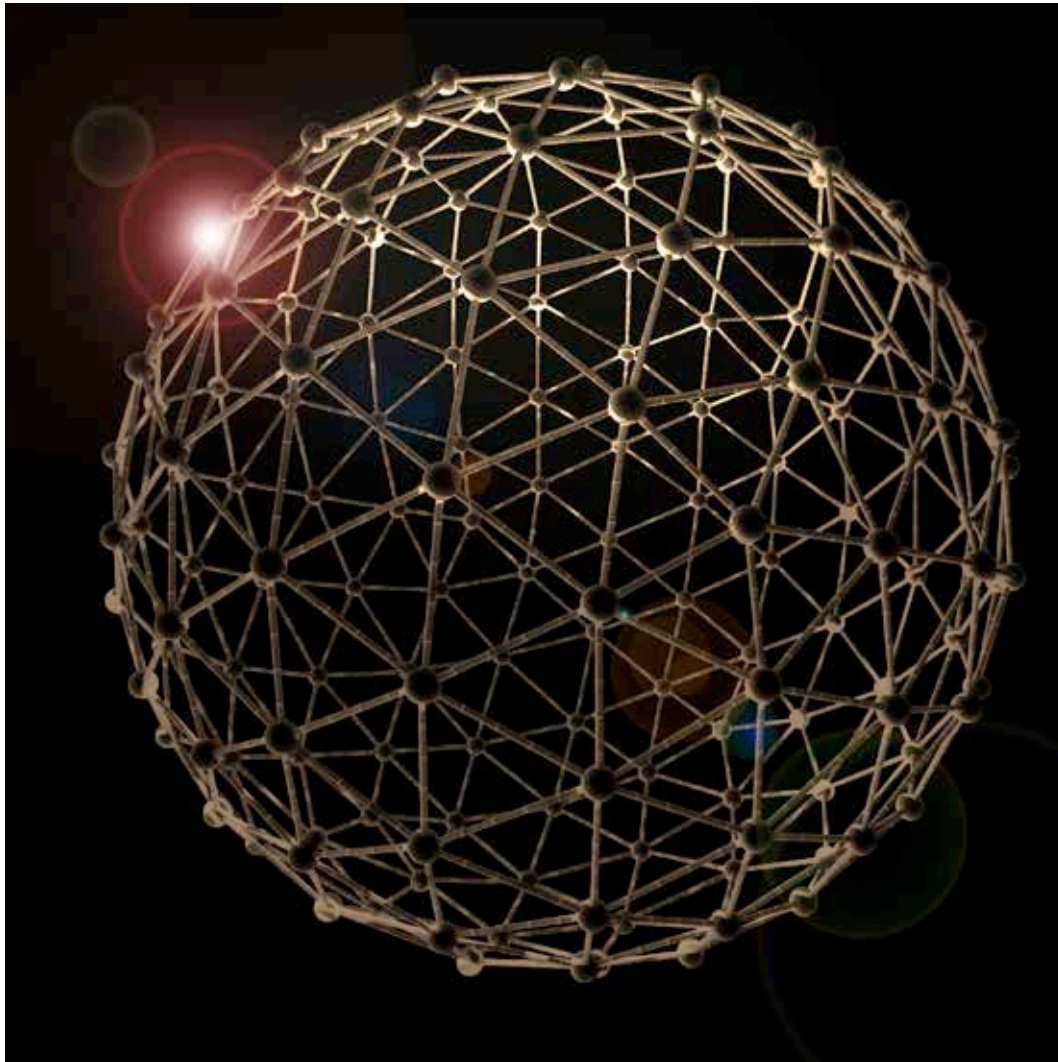
Eduardo Punset, escritor y divulgador científico, explica que “la felicidad es la ausencia de miedo”. Creo que la contemplación de construcciones geodésicas y en general de mallas resueltas por ensamblaje de múltiples piezas produce ese estado de paz (“felicidad” y ausencia de temor) en el que el homo sapiens se encuentra cómodo, porque puede pensar –intentando comprender– y jugar a buscar las razones lógicas –el patrón– de su integridad. La felicidad precisa de una cierta dosis de incertidumbre, pero si observamos una solución (además esférica y resuelta por partes independientes que genera un todo dependiente) advertimos equilibrio, y por tanto paz.

Además de este valor de integridad, las formas geodésicas o mallas curvilíneas contienen referencias a ítems estéticamente atractivos, como son la presencia de formas básicas, la interrelación de esas formas en proximidad, la intersección, el ritmo estructural, la radiación, la graduación y la anomalía (o su ausencia). Estos son criterios bien conocidos que los creativos estéticos conocen, explotan y aplican (a veces de forma metódica, otras espontáneamente) a sus obras.

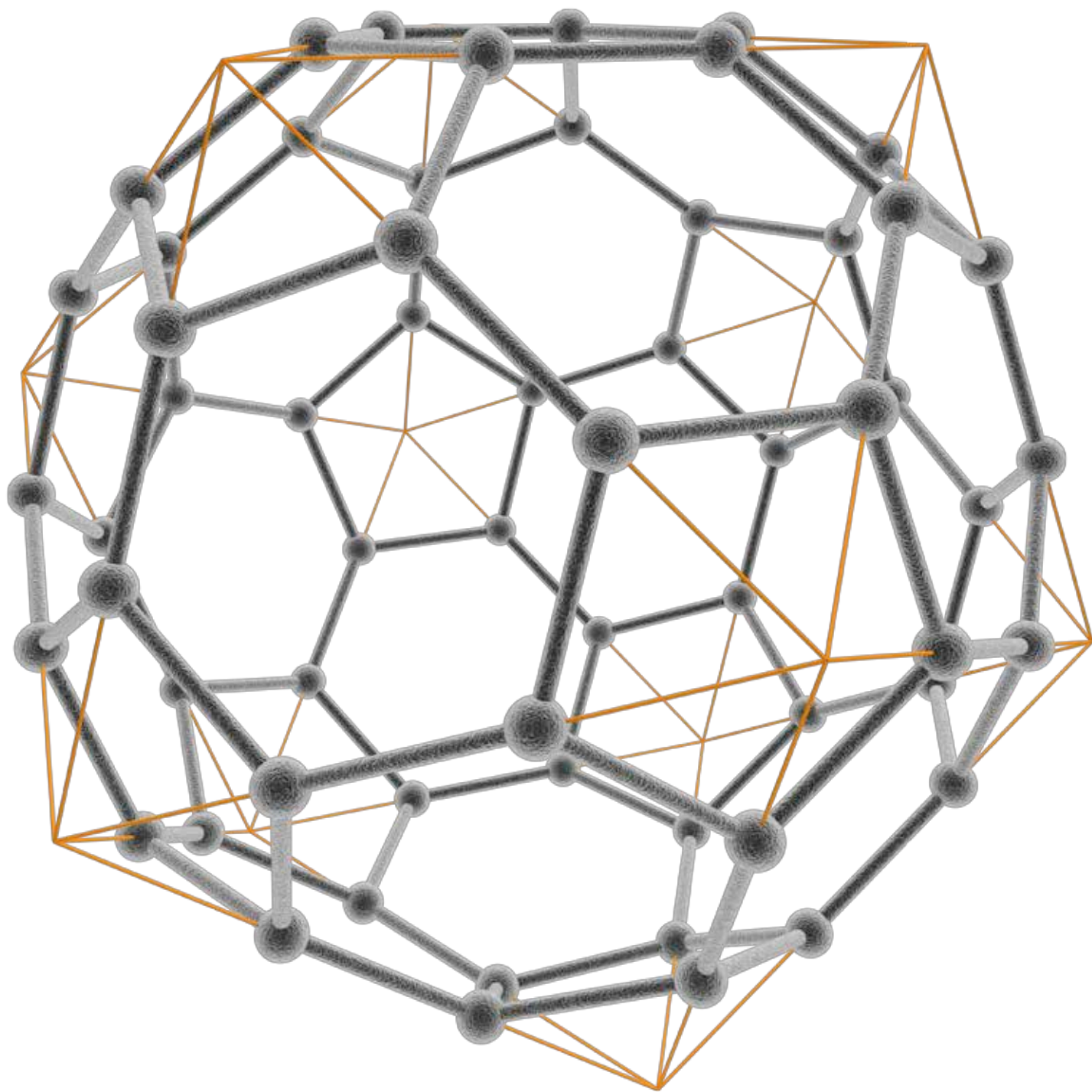
Y el ritmo. Nos agrada la secuencia lógica (o que entendemos como lógica, cada uno con su experiencia, su entorno cognitivo y su acervo cultural) y el suceso previsible (o su alteración). Puede que ello sea la razón del placer de observar un amanecer o de extasiarse ante un atardecer, una nevada (a resguardo), el oleaje al borde de una playa o permanecer frente a una chimenea encendida. En todos estos casos los sucesos aislados son conocidos y predecibles (ausentes de miedo); también el desenlace final.

Otro interesante ítem a considerar es la creciente atracción por las formas orgánicas, algo que se ha llegado a convertirse en una disciplina hoy día desarrollada bajo denominaciones como la biotécnica o biotecnología (estudio relacional entre vida y tecnología), la biomecánica (que observa las conexiones entre las leyes de la mecánica a la estructura de lo vivo), la biomorfología o la biomímesis, que acude a la naturaleza como fuente de inspiración. En la arquitectura, la medicina, la ingeniería, la psicología, el arte. Las formas globosas (celulares), el espacio fibrado de estructuras conexas y la morfología geodésica o de las mallas estructurales nos acercan estéticamente a estructuras como los árboles, las raíces, las células, los radiolarios, etc.

Observemos esta creación: muchos desconocen que contiene las bases geométricas de la vida tal y como la conocemos. Se trata de la imagen de una de nuestras versiones de la obra "El secreto de la vida", en este caso proyectada con madera de bambú.



infografía LM



el reto de la geodesia

Para un aficionado a la geometría, generar formas geodésicas supone uno de los mayores retos conceptuales, constructivos y estéticos; en suma, se trata de curvar el espacio conectando innumerables nodos integrados en una malla para generar finalmente una cúpula semiesférica, o bien una esfera.

No es este el lugar para repasar la historia de los procedimientos que permiten abordar este tipo de construcciones, por cierto basadas en la teselación bi- y tridimensional, en nuestro caso de superficies y volúmenes curvos. Pero es interesante saber que existen muchos métodos, casi todos basados en diferentes teoremas matemáticos que generan otros tantos modelos constructivos. En la bibliografía cito interesantes revisiones, como la de María Mallo o propuestas como la de Togores y otros.

Todos esos métodos buscan la teselación eficiente de la superficie de la esfera; como ya explicamos, la teselación o subdivisión regular de una superficie plana que históricamente ha interesado a numerosas culturas (especialmente a los árabes) no es tan reciente cuando se trata de discretizar para su construcción una superficie esférica. Este tipo de estructuras, como los domos geodésicos, formados por una malla de barras y nudos dispuestos según las aristas y vértices de un poliedro inscrito en la esfera, es un tipo constructivo bastante actual: de mediados del siglo XX.

La publicación de Togores, Otero, Díaz y Manchado se titula precisamente Un procedimiento alternativo para el diseño geométrico de estructuras espaciales; desarrollado en el seno de EGICAD, Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica de la Universidad de Cantabria, refiere la integración de métodos de geometría computacional en el diseño geométrico de estructuras que se aproximan a la esfera, proponiendo novedosas alternativas a los ya conocidos.

La tesis doctoral de la Dra. Mallo (ETSA de la Universidad Politécnica de Madrid) ofrece una profunda y meticulosa revisión del conocimiento actual sobre los sistemas radiolarios, sus geometrías y arquitecturas derivadas. Mallo parte del estudio pormenorizado de esos seres vivos que contienen intrincados endoesqueletos para aproximarse al apasionante universo de las mallas tridimensionales curvilíneas. Sin duda, se trata de un trabajo excelente; su contenido me ha servido de gran ayuda.



Existe una forma evidente de generar una malla sobre una superficie esférica, que se utiliza para dividir el globo terráqueo en meridianos y paralelos; como saben, el resultado es la generación de poliedros cuadrangulares. El problema de este tipo de poliedros es que sus lados son curvos, lo que se podría solucionar implementando barras rectilíneas. Pero si se observa, cada grupo de poliedros de dos paralelos adyacentes tiene una medida distinta: algo realmente complejo.

Ya expuse que la teselación perfecta aspira a utilizar una única figura, y es ese el objetivo de los geómetras que trabajan en geodesia, fundamentalmente para ahorrar medios y costes, y también para aspirar a valores como la homogeneidad y la... llamémosle perfección.

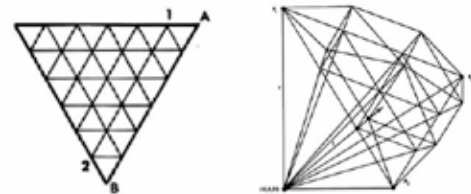
Al margen de detalles técnicos, los criterios que compartimos los diseñadores de formas geodésicas suelen ser básicamente los mismos:

- La forma generada debe aspirar a la máxima esfericidad.
- El número de caras debe ser el mínimo posible para alcanzar la esfericidad pretendida.
- La teselación debe ser lo más homogénea posible: la variabilidad geométrica de sus caras debe ser la más baja posible.
- La forma debe tener la máxima simetría.

A estos criterios, como verán más adelante, hay que implementarle valores constructivos y de diseño de piezas que nos permitan, por un lado, asegurar la integridad, estabilidad y seguridad de las creaciones, y por otro, sistemas que solucionen problemas relacionados con el montaje, medios y presupuesto disponible, etc.

critérios de diseño

Fue el ingeniero alemán Walther Bauersfeld el primero en diseñar y fabricar, en 1922, la primera cúpula geodésica conocida, aunque fuera Fuller, 20 años después, su gran desarrollador y difusor. Ambos acudieron al sistema de proyección de parámetros de un sólido platónico sobre la superficie de la esfera y coincidieron en la utilización del icosaedro como diseño base.

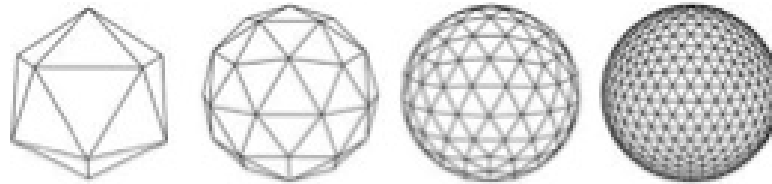


El gran sistematizador de esta estrategia fue el equipo de Joseph Clinton, en la Southern Illinois University (Campus de Carbondale, USA). Publicó varios métodos aplicables a cualquier poliedro de caras triangulares, con lo que permitió generalizar esta estrategia para incluir otros poliedros distintos al icosaedro. Veamos en qué se fundamenta esta estrategia.

Si desde el centro de una esfera trazamos doce líneas radiales hasta que alcancen su superficie –de forma que alcancen puntos equidistantes– y las conectamos entre sí por líneas secantes, obtendremos un icosaedro, con sus veinte caras triangulares. Esas doce líneas generarán veinte “poliedros cónicos de sección triangular”, en realidad tetraedros regulares. Por tanto, la construcción geodésica así generada se denomina icosaedro y su esfericidad (cociente entre su volumen y el de la esfera circunscrita) será del 61 %.

Si en lugar de realizar la proyección sobre la superficie de la esfera con ese número de líneas radiales, la realizamos apuntando desde el centro de la esfera de forma que pasen no por los vértices sino por subdivisiones de las caras de un icosaedro, obtendremos figuras más esféricas aún.

En función del número de veces que dividamos la cara de un icosaedro podemos obtener más caras triangulares y con ello aproximarnos más a la esfera perfecta.



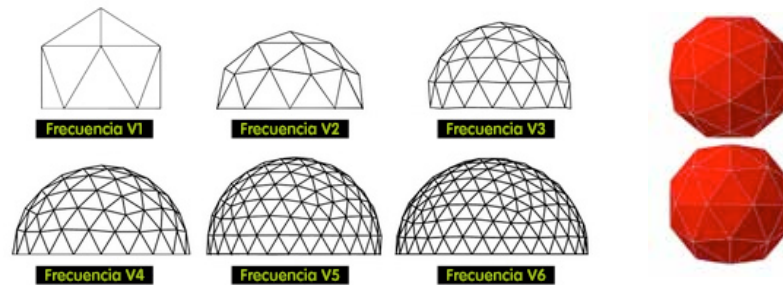
A esta estrategia de subdivisión se denomina frecuencia; a mayor frecuencia (o subdivisión de las caras de un icosaedro) aumenta tanto el número de caras del poliedro como la esfericidad de la forma final. Pero incrementando la frecuencia generamos más complejidad de diseño y dificultad de montaje, ya que aumenta el número de barras estructurales y de conectores nodales.

Para comprobar que las esferas creadas son posibles, aplicamos el teorema de Euler para poliedros convexos, que expresa que la suma del número de caras (triángulos superficiales), el de vértices (nodos de conexión) menos el de aristas (barras estructurales) debe ser igual a 2:

Datos generales de esferas geodésicas icosaédricas / en función de la frecuencia					
frecuencia o complejidad	nº div caras del icosaedro	total caras (triángulos)	barras estructurales	nodos de conexión	EULER (C+N-V)
V1	1	20	30	12	2
V2	4	80	120	42	2
V3	9	180	270	92	2
V4	16	320	480	162	2
V5	25	500	750	252	2
V6	36	720	1080	362	2
V7	49	980	1470	492	2

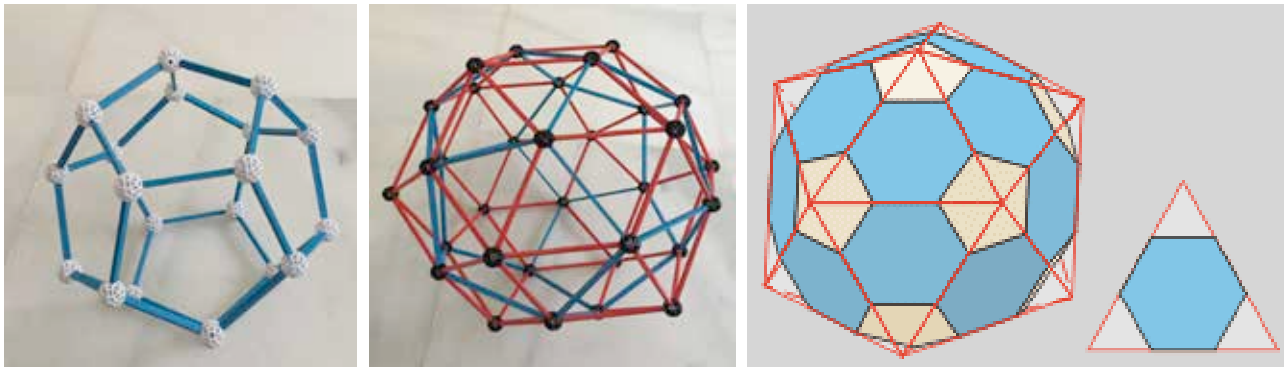
Si en lugar de esferas geodésicas diseñamos cúpulas equivalentes a –aproximadamente– la mitad de una esfera basada en el icosaedro, su aspecto, en función de la frecuencia empleada, sería el siguiente:

Del mismo modo que se utiliza el icosaedro como base geométrica para obtener esferas geodésicas, se pueden usar el resto de los sólidos platónicos, como el tetraedro, el octaedro o el dodecaedro.



Por ejemplo, hemos calculado que una esfera geodésica octaédrica de frecuencia V2, con el mismo radio que la esfera circunscrita de una icosaédrica y con el mismo nivel de complejidad, es algo más esférica.

Para obtener esa esfera necesitaremos usar 90 largueros estructurales y 32 conectores nodales, que generan 60 triángulos tisulares (superficiales); esa estrategia nos permite incrementar la esfericidad del dodecaedro (84 %) hasta el 91 %.



dodecaedro y esfera geodésica dodecaédrica de frecuencia V2 (AD)

Otra forma sencilla de generar una esfera geodésica, tal y como expuse en el capítulo primero, es a partir de un fullereno, que como sabemos es un icosaedro truncado a un tercio de cada arista; al hacerlo obtendremos una figura con 32 polígonos regulares: 20 hexágonos y 12 pentágonos.

Si dividimos hasta obtener sus triángulos naturales esos 32 polígonos regulares obtendremos, con el mismo criterio que Fuller, una esfera geodésica de frecuencia V3, ahora con 180 caras triangulares de dos tipologías, por cierto todos isósceles, ya que los triángulos de los hexágonos hay que elevarlos para que sus vértices virtuales alcancen la tangente de la esfera.

Habr  observado el lector que, al margen de estas estrategias constructivas, el problema las construcciones se resume en encontrar una soluci3n eficiente y asequible para la conexi3n de barras estructurales con conectores.

Por tanto, y centrando el problema, se trata de posicionar espacialmente y de forma estética en el espacio (curvo) una serie discreta de nodos o conectores (los puntos de referencia de la superficie esférica circunscrita) y de barras estructurales, encargadas de estacionarlos.  O es al revés?  Qui n sostiene a quién?

Esta sencilla cuesti3n afecta notablemente al diseño, en especial a su estrategia: esta cuesti3n fue precisamente el punto de partida de nuestro estudio **a+i+d** en el abordaje de nuestra excursi3n por este apasionante universo de la geodesia.

nuestra excursi3n geodésica: DOME'UP

Como he dicho, en la navidad del año 2010 contact  con Luis Manuel L3pez para hablar con él de mi interés por las estructuras geodésicas. Esa conversaci3n tuvo lugar debido a que Luis Manuel y yo teníamos ya una cierta afinidad y confianza profesional; me refiero a que era consciente de que sin su ayuda será verdaderamente difícil siquiera aproximarme a esos sistemas constructivos y que intuía que la idea le gustará. Sabía de su solvencia y su indudable capacidad para lograrlo; además de interiorista y delineante, tenía amplia experiencia en el diseño gráfico y conceptual de formas espaciales y en ingeniería constructiva. Y además el problema parecía difícil, algo que sabía que a Luis Manuel le agradaba.

Otro valor que me atraía del desempeño de Luis Manuel es su capacidad de trasladar las ideas al papel. Yo ya conocía su capacidad -inusual- para convertir conceptos en imágenes (est ticas o dinámicas) para así poder comunicarlas. Además de un s3lido criterio comunicacional, dispone de suficientes herramientas cognitivas y técnicas conversacionales en este universo del diseño, algo realmente complejo y al alcance de muy pocos y que, en el caso de este diseñador, transcurre con suma fluidez y rapidez.

Así que tras nuestra primera conversaci3n nos pusimos a trabajar para sentar las bases de un proyecto que se denominar  DOME'UP , en el que básicamente englobar mos nuestros trabajos relativos a la triangulaci3n estructural y a la fabricaci3n de cúpulas geodésicas.

De las posibles configuraciones que puede adoptar una forma geodésica, decidimos apostar por una serie de valores que poco a poco hemos ido desarrollando e implementando, no solo en nuestras cúpulas geodésicas, sino también en las esferas con las que ahora trabajamos y en otros sistemas mallados.



1. Buscábamos sistemas eficientes, tanto desde el punto de vista del diseño como de la funcionalidad –estética y constructiva– de las creaciones.
2. Pretendíamos prever, en todo el proceso, la plausibilidad de nuestros estudios, calculando todos y cada uno de los parámetros de forma que su traslado a la realidad de los materiales y al proceso de fabricación, el montaje, el transporte, la estabilidad o la durabilidad fuera posible.
3. El estudio se dedica al arte, por lo que los valores estéticos eran muy importantes; el abstracto concepto de la elegancia habría de estar presente en todo momento.
4. Pretendíamos generar un programa de diseño completo, configurado de principio a fin y de forma vertical y transversal, que contemplara un amplio abanico de posibilidades, entre ellas la escalabilidad; es decir, que ese programa previera diferentes tamaños o escalas de trabajo.
5. Valores como eficiencia, sostenibilidad y compromiso social habrían de estar asimismo presentes tanto en los procesos como en los resultados.

Antes que nada analizamos los trabajos subyacentes sobre construcciones geodésicas y generamos el entorno legal y de imagen corporativa adecuado a una posible difusión del programa. Para ello creamos una marca registrada, que asociamos a todas las piezas generadas.

Lo siguiente fue elegir la estructura base de nuestros estudios. Ya hemos visto que una cúpula geodésica se puede construir de muchas formas, con diferentes criterios y con varias configuraciones formales. Decidimos centrarnos en un sistema constructivo basado en el icosaedro (y el fullereno) y en un nivel de complejidad tipo V3, ya que buscábamos un diseño de suficiente visibilidad en su configuración estructural; es decir, que la malla o estructura desnuda contuviera de por sí todos los valores pretendidos.

Para llegar a esa conclusión barajamos el nivel de esfericidad que ofrece esa estrategia, así como el número de piezas a manejar (y diseñar) y sus requerimientos de montaje; pretendíamos que la cúpula fuera escalable y desmontable con sencillez, por lo que el número de piezas y operaciones en el proceso de montaje debía ser limitado.

A continuación testamos diferentes materiales, considerando pesos, costes, estabilidad, accesibilidad y durabilidad. Como pretendíamos un diseño desmontable y para exteriores, necesitábamos que los materiales fueran de peso reducido sin sacrificar con ello la durabilidad, por lo que optamos finalmente por el aluminio.

Respecto a los tamaños, optamos por estructuras comprendidas entre 4 y 10 metros de diámetro de esfera; esos tamaños eran manejables y asociables a los materiales empleados, a nuestro espacio de trabajo y a nuestras posibilidades constructivas.

Ya puestas las manos a la obra, abordamos una decisión importante. Unas líneas antes planteaba una curiosa cuestión, relativa a la política de diseño. En una malla geodésica, quién sostiene a quién: ¿los nodos a las barras o al contrario?

Luis Manuel y yo estudiamos a fondo esta cuestión y apostamos por una solución intermedia. Las barras estructurales habrían de tener suficiente momento de inercia (estabilidad a la flexión) para que la estructura se mantuviera estable, pero también habrían de disponer de flexibilidad conjuntual. Porque algo que hemos aprendido es que en este tipo de estructuras la flexibilidad opera a favor de la estabilidad global y que son necesarias ciertas tolerancias, de forma que, una vez cerrada la cúpula o esfera, la propia estructura se estabiliza siempre que los elementos que la forman dispongan tanto de flexibilidad como de ciertas demasías o tolerancias.

Esto ocurre porque las cúpulas geodésicas, a diferencia de otras estructuras conformadas por celosías tridimensionales, pueden sufrir pandeo global sin que ninguna de las barras comprimidas haya sufrido pandeo local: un cálculo como estructura lineal convencional y la comprobación posterior de pandeo local puede no ser adecuado para grandes luces; requiere un cálculo no lineal para determinar sus cargas críticas y así asegurarnos de que no se producen fenómenos de inestabilidad elástica.

Decidimos utilizar tubos cilíndricos frente a otros perfiles angulares; lo hicimos porque la estética se nos antojaba más acorde con los valores visuales que pretendíamos, y su aspecto (en exterior bajo la luz del sol o sometida a iluminación artificial) ofrecía más posibilidades. Respecto al diámetro de los tubos, optamos por reducir el diámetro más usual o comercial de 50 mm por otro de 40 mm, que nos permitió ahorrar, con esta sola decisión, un 20 % de peso y también de costes de materiales, sacrificando muy poco la estabilidad y visibilidad. Habríamos de tener en cuenta que nuestras cúpulas geodésicas se construían con un gran número de tubos conectores (165), ya que decidimos generar formas de un perfil de 5/8 del diámetro de la esfera. Y para construir esferas completas habríamos de usar 270 largueros estructurales: una barbaridad.

Una vez solucionadas las barras estructurales, estudiamos a fondo el sistema de conexión nodal, ítem que estaba condicionado por nuestra elección de perfiles cilíndricos. Las opciones fueron muchas y tras analizar emprendimientos pre- y coexistentes decidimos descartarlos y abordar nuestra propia estrategia; habríamos de tener en cuenta el diseño de más de 60 conectores de diferentes tipologías (92 para una esfera cerrada).

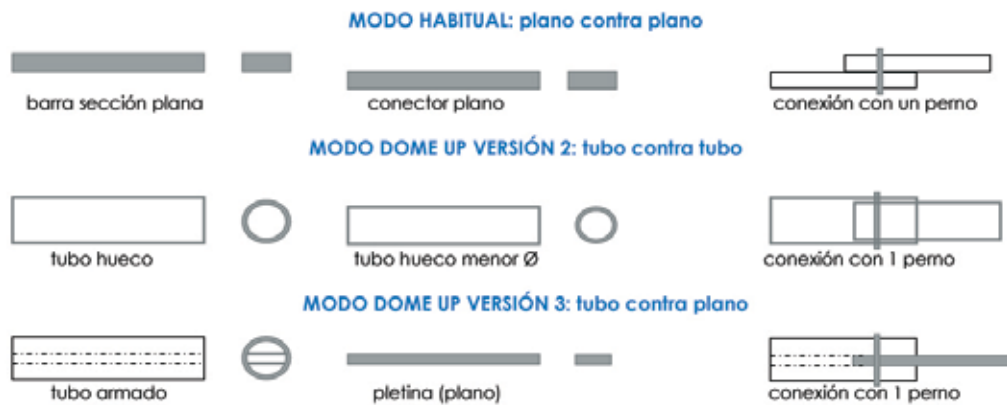
El primer sistema que estudiamos fue el habitual de encuentros tubo-tubo: unión directa de los extremos tras el aplanado de los terminales de los cilindros; es decir, atornillar plano contra plano.



El primer sistema quedó descartado, ya que no nos permitía asegurar la estabilidad y porque la gestión de las angulaciones se nos antojaba compleja, algo muy importante en montajes geodésicos.

Como explicaba, en geodesia es imprescindible ubicar, de forma azimutal exacta, los nodos en la superficie virtual de una esfera. Para ello usamos conectores que contemplan dos tipos de angulación: la correspondiente al encuentro horizontal de los largueros estructurales (encuentros de 4 a 6 piezas longitudinales) y la angulación superficial; es decir, la implementación de la suficiente angulación vertical para que se genere una forma curva.

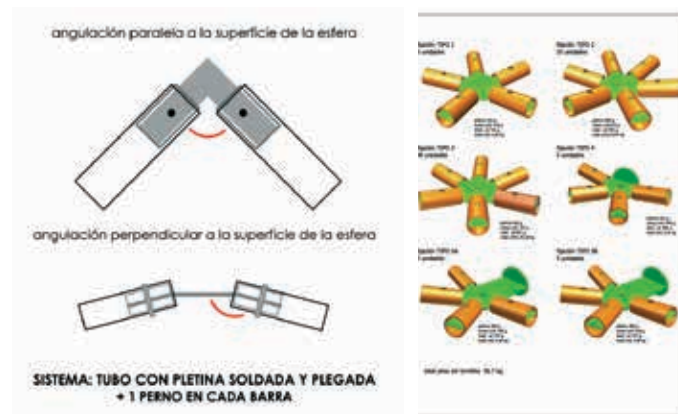
VERSIONES DE CONECTORES BARRA ESTRUCTURAL - NODO



Este asunto de las conexiones interlargueros es algo que la ingeniería aún no ha solucionado de forma eficiente. En a+i+d empleamos mucho tiempo y medios en encontrar soluciones a este problema, porque pensamos que quien halle una solución global, transportable a diferentes ámbitos y materiales adquirirá una enorme ventaja. Disponemos de bastantes conocimientos, pero nuestros medios son limitados para desarrollar un buen programa de I+D+i (investigación, desarrollo e innovación) que nos permita obtener éxitos aplicables; como el asunto merece la pena, seguimos estudiándolo.

Por tanto, la eficiencia de las conexiones es determinante. Deben ser piezas sencillas de fabricar (mejor por mecanización sencilla, reducidas operaciones de manipulado y baja carga de soldadura), usando materiales estables pero dotados de cierta flexibilidad y cuyo montaje no sea complejo; han de servir de posicionadores azimutales exactos, ya que –en la práctica– pequeños errores se convierten, por acumulación, en dimensiones que pueden llegar a imposibilitar el ensamblaje.

En **DOME'UP** hemos desarrollado dos versiones de estos nodos posicionadores, uno de ellos para tubos cilíndricos huecos y otro para una versión de tubos estructurales reforzados en su interior, también desarrollados por nuestro estudio.



En la primera versión preparamos un sistema de conexiones que generaba el ensamblaje de tubo estructural contra una conexión que contenía una terminación cilíndrica de menor diámetro, de suerte que, con esta estrategia, usábamos un solo perno por extremo de cada tubo, resultando una unión estable. Las angulaciones estaban contenidas en la chapa soporte, que se fabricó en acero con tratamiento estabilizador en superficie. Esta conexión resulta flexible, asequible, suficientemente ligera y sobre todo, exacta, estable y duradera, y por tanto: eficiente.

Con esa política preparamos todos los conectores necesarios (se precisan de varias tipologías: de cinco y de seis vías, para el encuentro con el suelo y para las puertas de acceso a la cúpula) y tras unos tests de prueba de materiales, nos pusimos a fabricar mediante corte y plegado numérico.

Decidimos fabricar tres tamaños de cúpulas, de 7, 10 y 14 metros de diámetro. Los tres tamaños comparten el mismo tipo de conectores, por lo que para montar diferentes tamaños únicamente habríamos de disponer del correspondiente juego de tubos estructurales; las conexiones son similares en todos los tamaños.

Nuestras cúpulas se montan con herramienta manual, usando llaves sencillas de métrica comercial (habitualmente M8), siempre moviendo pesos reducidos.



Y así logramos montar, con éxito, nuestra primera cúpula geodésica.



cúpula geodésica modelo DOME'UP 10 m, de 10 m de diámetro y 6,2 m de altura (AD)



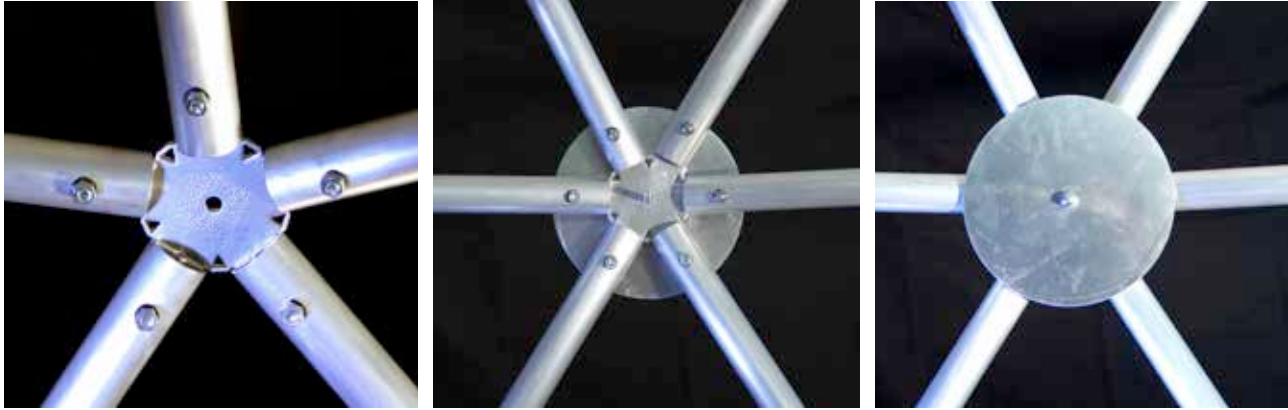
infografías de DU 10 M (LM)

A esta versión la denominamos V2 y para su construcción empleamos 160 tubos conectores, 60 conectores y 320 pernos de acero. Además usamos 60 embellecedores (pares de discos de aluminio que ocultan los nodos conectores, con finalidad estética) que precisan otros 60 pernos más.



Esta estrategia ha sido evolucionada hacia la versión V3. Para ello hemos optimizado los tubos estructurales, incrementando el momento de inercia gracias a una estrategia consistente en fabricar, por extrusión del aluminio, tubos con armazón interno, para lo que -tras explorar numerosas soluciones- optamos por elaborar una matriz de extrusión que, conservando el diámetro exterior de 40 mm, nos permite aligerar y simplificar drásticamente los conectores nodales y utilizar planchas de 5 mm de espesor (de acero o de aluminio) que, fabricando por mecanizado y en solo dos operaciones (corte y plegado numéricos), nos ofrece la gama completa de conectores necesarios para montar nuestras cúpulas.

Para ello hemos explorado numerosos modelos y descartado otros tantos, como el mostrado arriba, hasta obtener un sistema que nos resultara realmente funcional.



La nueva versión V3 permite que las conexiones queden aligeradas, el sistema de montaje sea más sencillo aún y el coste de fabricación de las conexiones reducido a la mitad; además, los tubos estructurales son más rígidos y, en suma, nuestras cúpulas DOME'UP resultan más estables y eficientes.

En esta nueva versión los nodos conectores adquieren un papel más relevante como simples posicionadores y los tubos se comportan como conectores estables entre nodos. De esta forma, además de obtener más estabilidad global en la obra final (la cúpula geodésica) se mantienen en equilibrio la flexibilidad de las partes que la componen y la suficiente rigidez de las mismas para generar un todo estable.



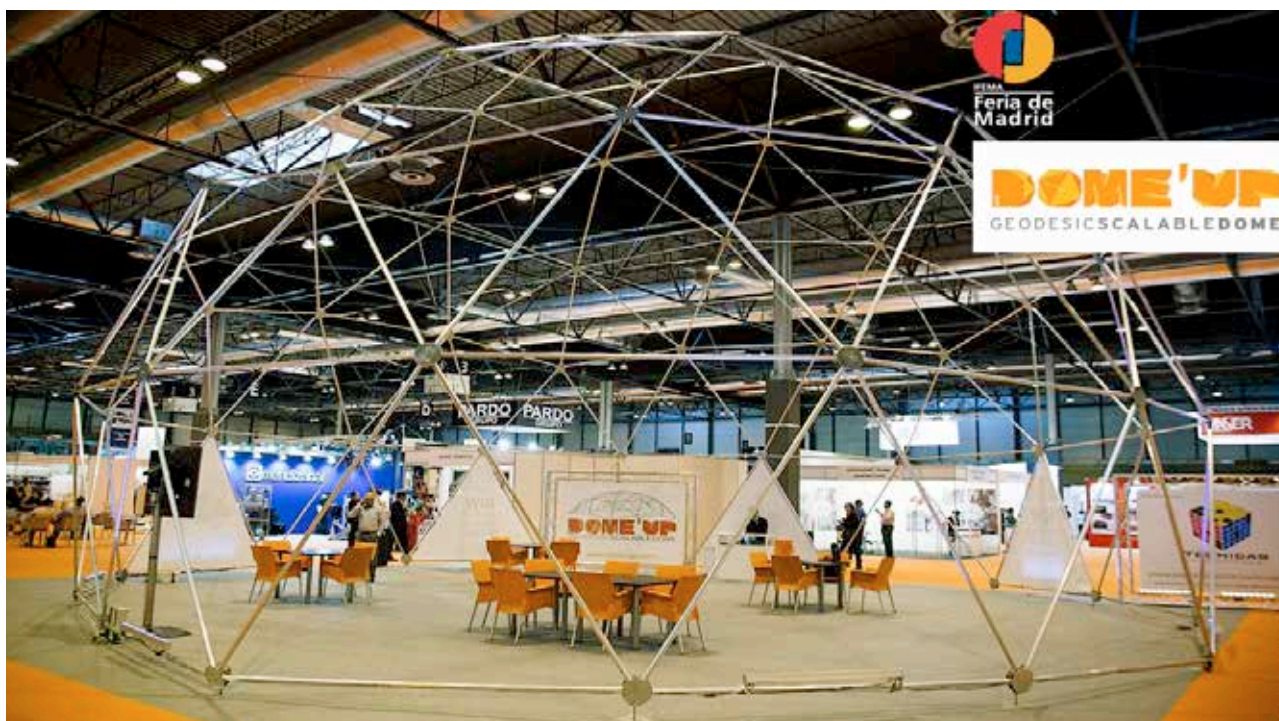
a la izquierda, nuestro modelo DU7S, de 7 metros de diámetro y 4,2 m de altura
a su derecha y abajo el modelo DU15L, de 14 m de diámetro y 9 de altura

MODELO	DU7S	DU10M	DU15L
diámetro máx. (m)	7	10	14,5
superficie / cota suelo (m ²)	38,5	78,5	163
altura (m)	4,2	6,2	8,9
volumen (contenido, m ³)	140	410	1350
peso (kg)	180	250	550
aforo (1 persona por m ²)	38	78	163

Ahora nuestro programa de diseño permite gran variabilidad de tamaños, volúmenes y usos, aunque decidimos fabricar tres tamaños o escalas, con las siguientes características:

El uso de nuestras cúpulas como contenedores o fragmentadores espaciales resulta realmente eficiente; de hecho definimos el producto como "diferenciador espacial" para uso expositivo y en comunicación diferencial de alto impacto.

Sus parámetros de superficie generada por kilogramo de material constructivo empleado oscila entre 0,2 y 0,3 m²/kg, algo muy difícil de obtener en la construcción convencional. De igual forma, el valor del volumen generado por kg empleado es verdaderamente elevado, entre 0,8 y 2,5 m³/kg empleado. Y como es común en los domos geodésicos, la ratio superficie ocupada/volumen generado es suficientemente alto, de entre 4 y 8 m³/m² para el peso de material empleado antes descrito.



Cúpula DOME'UP LARGE / 14,5 m de diámetro y 8 m de altura. Fotografía: LF

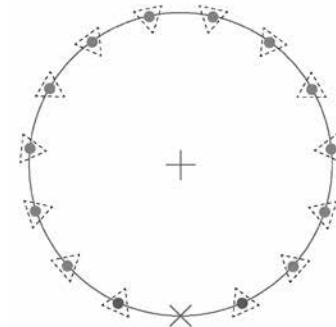
En el programa DOME'UP tuvimos que solucionar diferentes aspectos relacionados con el montaje estable y la usabilidad de nuestras cúpulas, como las conexiones a suelo, las coberturas, la iluminación y el propio sistema de montaje, para lo que implementamos los correspondientes subprogramas, dedicado cada uno de ellos a la generación de soluciones eficientes.

Respecto a las conexiones a suelo (las bases que soportan el peso de las cúpulas), encontramos soluciones eficaces que además nos permiten modular la altura final de nuestras cúpulas y salvar pequeñas irregularidades del terreno. Las cúpulas se sostienen sobre 14 (15 en las cúpulas grandes) peanas modulares en altura; cada una de ellas soporta un máximo de peso de entre 13 y 35 kg (en función del tamaño).

En pleno desarrollo de nuestro programa de diseño nos topamos con la necesidad de implementar coberturas usables en ambientes exteriores. En realidad el programa DOME'UP se desarrolla en un ámbito que mezcla valores estéticos arraigados en el diseño estructural, por lo que no nos apetecía en absoluto cubrir (ocultar) la estructura de nuestras cúpulas.

Pero las exigencias de nuestros clientes fueron suficientes para obligarnos a abordar métodos de cobertura, que comenzamos con criterios convencionales (sistemas textiles o poliméricos envolventes) usando los polímeros actuales termosoldados, fabricados a medida de la simetría de nuestras cúpulas; de esta forma generábamos una estética "tipo invernadero".

Entonces, todo nuestro esfuerzo de contención de pesos y de sencillez constructiva (sin levantar los pies del suelo) se vio comprometido, pues las coberturas pesaban más que la propia estructura; además sacrificábamos la brillante visibilidad de la estructura y con ello los valores comunicacionales que pretendíamos para nuestro programa. Únicamente nos resultaban atractivos sistemas livianos de protección contra la insolación y que ejercieran simultáneamente de "trampas de la luz" que emitiéramos desde cota suelo.



Esquema de los pies de soporte de las cúpulas DOME'UP





coberturas basadas en triángulos textiles independientes (LM)



cobertura suspendida / tensionada dentro de la cúpula, fácilmente desmontable (LM)

Por ello estudiamos sistemas basados en la fragmentación de las piezas de cobertura, usando los propios embellecedores de los nodos conectores como soportes de las diferentes piezas cubrientes; de hecho tales discos embellecedores portan un sistema de troquelado numérico que prevé el anclaje de esas piezas.

Como digo, realizamos un amplio estudio de coberturas, desde la cobertura total hasta soluciones destinadas a servir de simple cobertura contra la insolación o como trampas de luz, de forma que capturan la iluminación emitida a cota suelo.

Utilizamos sistemas que emplean triángulos independientes o soluciones textiles más complejas, siempre guardando la estética geodésica –estructural– del programa de diseño.



cobertura / trampa de luz basada en cinco triángulos tensados, de montaje rápido (AD)

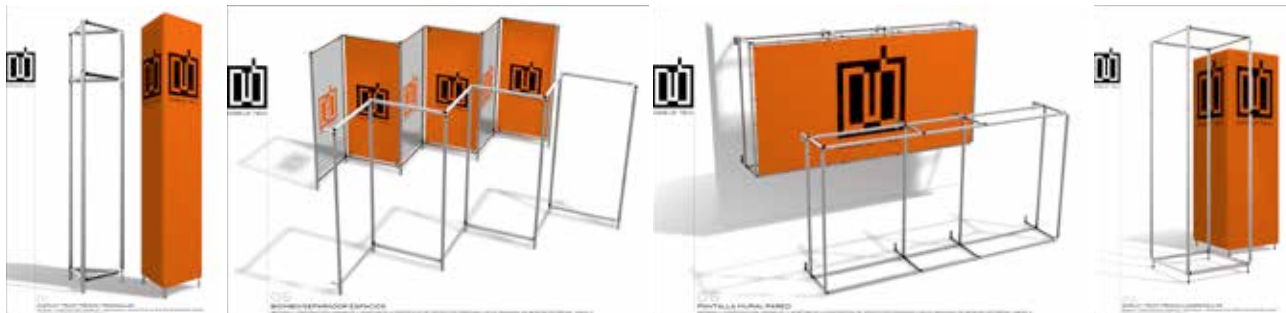
Las coberturas se diseñan de forma que no interfieran con la atractiva estética tisular de la trama geodésica, de suerte que muestren la malla estructural. La iluminación que propone nuestro programa se basa en el uso de emisores de leds (wall washers) ubicados a cota suelo y en la línea de las peanas, para que la luz emitida contra los tubos estructurales de sección cilíndrica pueda ser apreciada a distancia.

El sistema de montaje de las cúpulas se solucionó invirtiendo la estrategia habitual de montaje de estructuras. En lugar de montar desde suelo a cielo, utilizamos pequeñas torres elevadoras que van subiendo la estructura conforme se va montando. Para ello empleamos cinco pequeñas torres a las que implementamos los soportes adecuados para que no dañen la estructura, de suerte que cada elevador ha de soportar únicamente entre 35 y 110 kg de peso.

Este sistema, que evita el trabajo en altura, permite que cualquier persona pueda montar nuestras cúpulas geodésicas sin mover pesos ni levantar los pies del suelo, evitando así accidentes.

Como explicaba páginas atrás, el programa DOME'UP también se desarrolla en un derivado denominado cUb (DOME'UP TECH), dedicado al diseño y desarrollo de piezas destinadas a uso como displays y mobiliario de comunicación en arquitectura efímera. Este programa contó con la colaboración del magnífico diseñador Luis Fano, que se incorporó al programa generando la imagen corporativa y piezas eficientes y de alto contenido visual.

El programa cUb se basa en el diseño de un conjunto cerrado de conectores y de tubos estructurales que permiten construir de una forma sencilla multitud de formas.



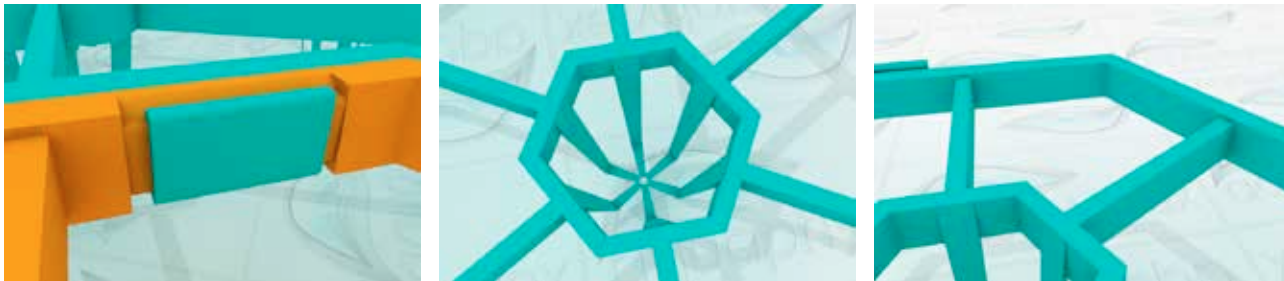
programa DOME'UP TECH / infografías de luis fano

Dentro de nuestros estudios de estrategia de teselación geométrica superficial, hemos desarrollado otros dos programas de diseño incardinados en usos o destinos bien distintos a los descritos.

El primero de ellos se realizó por encargo de empresas (fue más de una) dedicadas a la depuración de aguas residuales utilizando plantas macrofitas en suspensión. Estas empresas requerían un sistema eficiente de instalación de plantones vegetales en grandes superficies laminares de agua, que cumplieran un amplio programa de exigencias: flotabilidad, una determinada separación entre plantones, estabilidad en intemperie y adaptación al medio en movimiento que supone una lámina de agua de grandes dimensiones.

Además de esas características y como es habitual en este tipo de encargos con destino a producción industrial, hubimos de contemplar ítems como el coste reducido, la fabricación en serie por proveedores en diferentes partes del mundo, su transporte mediante palé estandarizado y la sencillez de su montaje por personal inexperto y/o en ubicaciones remotas.

Las soluciones requeridas se concretaban en realidad en la obtención de sistemas de teselación homogénea eficaces para superficies expuestas a movimiento, que solucionamos con piezas de polímeros de baja densidad con un diseño que permitía interconectar un número de piezas ilimitado. No me extendiendo en detalles porque pertenecen a patentes de las citadas empresas.



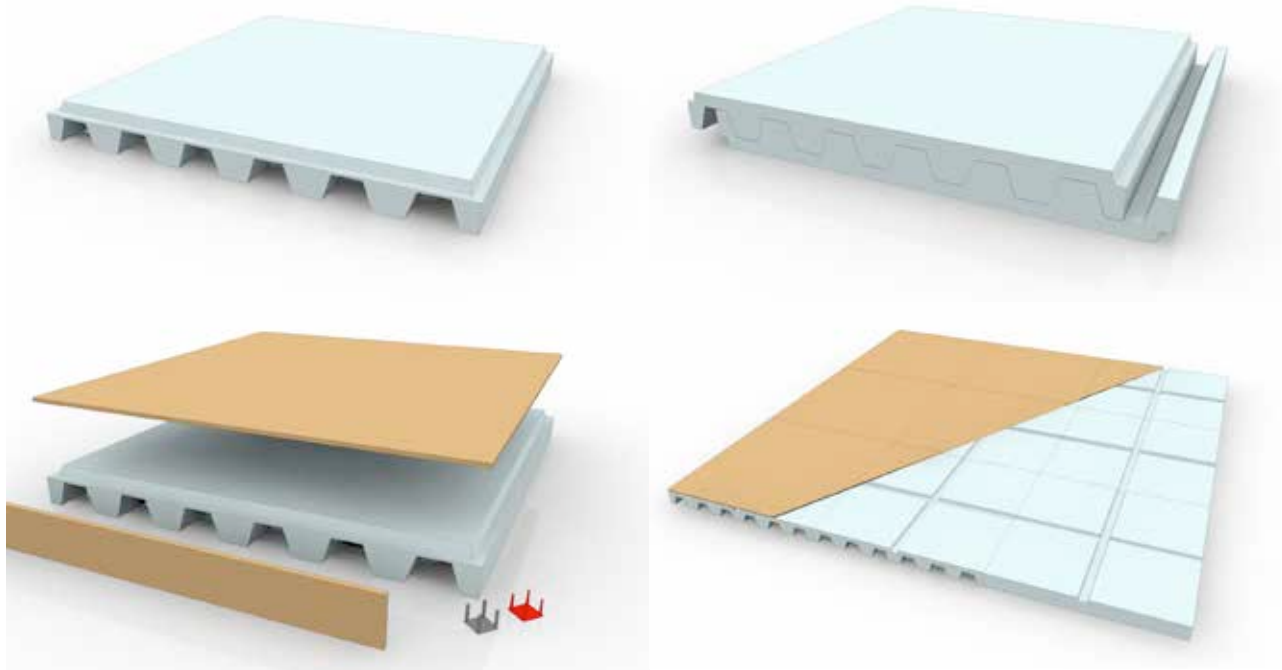
infografías de soportes modulares (LM)



AQ3M / imagen de Quarq Enterprise™

El otro programa de diseño se refiere a la configuración de suelos técnicos; se trata de elementos de utilización preferente en arquitectura efímera o convencional, que permiten elevar el plano de apoyo estableciendo una separación con el pavimento original y de paso permitir la implementación de conducciones de diferentes sistemas bajo (ocultos) la lámina transitable. Por supuesto, el coste era determinante, así como el peso, la portabilidad del sistema, la estandarización y la sencillez e inmediatez en el montaje.

Desde a+i+d diseñamos un sistema basado en dos capas, una lámina transitable rígida resuelta mediante teselación cuadrada que descansaba sobre una trama bidimensional de material polimérico de densidad media y de su misma superficie, que permite su ensamblaje ilimitado y por supuesto el cableado por diferentes canales. La teselación cuadrada responde a los intereses del fabricante, pues está destinado a habitáculos convencionales (cuadrangulares) como stands, oficinas, centros expositivos, eventos, etc.



infografías:LM

La gran ventaja del criterio de diseño que empleamos es que la fabricación de las piezas poliméricas se realiza mediante corte de hilo caliente y en una sola dirección. No puedo mostrar más detalles porque el diseño está sometido a intereses industriales.

En mi opinión y a modo de resumen, nuestras propuestas sobre estructuras geodésicas y de teselación aplicada ofrecen soluciones eficientes y de elevada usabilidad.

Nuestro programa DOME'UP supone una ambiciosa iniciativa de diseño de arte, pero también de carácter objetual industrial; en sus comienzos se realizó con la colaboración de otras dos empresas locales (la empresa de gestión de eventos Armonía y otra de impresión digital, Maktub Digital).

El programa dimana de otro más amplio, relativo a la investigación y desarrollo de conexiones tridimensionales eficientes para su uso en triangulación constructiva; es decir, centra su atención en el diseño y desarrollo de sistemas constructivos de estructuras basadas en la triangulación, utilizables en arte, arquitectura (efímera y definitiva), ingeniería, energía y decoración.

El programa DOME'UP, dirigido al universo de las formas cupulares geodésicas, supone uno de los primeros sistemas de diseño geodésico que permite modificar el tamaño final de las estructuras cambiando únicamente el juego de tubos estructurales (es escalable, por tanto); además, su sistema constructivo permite ofrecer dos configuraciones simultáneas: la utilización como cúpula geodésica (semiesfera completa o GEO) y también como soporte escenográfico o SCENE (la cuarta parte de una esfera), manteniendo la integridad y la solidez estructural.

Nuestro sistema de diseño contempla –desde su inicio y en todas las partes del proceso de diseño, fabricación, montaje y uso– la implementación de valores tales como eficiencia, ergonomía, ahorro energético, costes contenidos y estabilidad, así como el respeto al medio ambiente y al equilibrio social corporativo.

Para ello se han explorado y solucionado todas las tareas y procesos implicados, optimizando cada planteamiento, actuación, pieza y/o proceso hasta lograr un equilibrio funcional y eficiente, aplicando el programa de I+D con continuidad y en todos los procesos implicados, manteniéndolo activo de forma simultánea con las tareas de fabricación y en continua evolución adaptativa hacia los requerimientos de nuestros posicionamientos.

El conocimiento y derechos de propiedad industrial de DOME'UP pertenecen a a+i+d y a sus dos autores, que lideran la investigación, el diseño y los tests y desarrollo de las bases constructivas; los procesos de matriciado, extrusión, corte, plegado y pasivado de metales se realizan en diversas empresas españolas colaboradoras (principalmente Extrugasa) y proveedoras, siempre de un entorno amable y próximo.

a+i+d también dirige el programa de branding asociado, realizado en colaboración con empresas extremeñas del sector (entre las que destacan The Glow y www.luisfano.com) y con los mejores creativos y diseñadores objetuales y de imagen de marca de nuestro entorno, que colaboran de forma comprometida en el desarrollo del proyecto que –como hemos expuesto– desarrolla una spin off dirigida al uso de las conexiones actuales en la formulación y fabricación de elementos auxiliares y de arquitectura efímera (DOME'UP TECH): el programa cUb.

Los valores de innovación de DOME'UP se desarrollan no solo en un programa de diseño conceptual novedoso y optimizado, sino también en la ampliación del target de usabilidad de las creaciones y en un planteamiento procedimental basado en la solvencia, en el crecimiento sostenible, el respeto al medioambiente y en el trabajo colaborativo con proveedores locales.

trabajando en geodesia

Trabajar con mallados –y en particular, con mallados geodésicos– es tan complejo como apasionante. Hemos visto que su diseño puede realizarse desde muchas perspectivas, como puede ser la arquitectura o la ingeniería, aunque nosotros elegimos el universo del arte y la comunicación, desarrollando conocimiento a una escala más bien básica; es decir, de análisis y desarrollo conceptual.

En nuestro caso, hemos optado por trabajar en desarrollos incardinados fundamentalmente en el concepto y la forma de fragmentar el espacio, en la manera de acotarlo y de sostener tridimensionalmente formas y volúmenes, y en particular respecto a sus valores conceptuales, sus significados y consecuencias y en su aplicación al universo del arte y la comunicación

Debo decir que el panorama proyectual y de ejecución al que nos enfrentamos en la actualidad no tiene nada que ver con el que conocieron los primeros desarrolladores de formas geodésicas, como Bauresfeld o Fuller. Puedo citar algunas diferencias respecto a nuestras actuales condiciones de trabajo:

- Hoy día el acceso a la información es prácticamente ilimitado, de suerte que podemos conocer, de forma suficientemente detallada, el conocimiento actual y los trabajos de otros grupos de desarrollo, que podemos aplicar y/o transferir a nuestros programas de trabajo. A excepción de la investigación oculta, que como es lógico reserva su conocimiento y resultados –en especial en emprendimientos privados–, todo está accesible y además de forma remota y cómoda. Como en otros campos, este material no es reducido: en este universo hay numerosos grupos y centros de desarrollo de conceptos y materiales, porque sus aplicaciones son numerosas y muy interesantes.
- Las herramientas de diseño y de planteamiento proyectual actuales son realmente potentes. Disponemos de eficientes programas informáticos de diseño asistido que nos permiten proyectar, de forma exacta, no solo las piezas de forma unitaria (desde el punto de vista formal y funcional), sino generar entornos globales respecto a las condiciones reales de trabajo (peso, exposición a diversos entornos locales, etc.). Además podemos estudiar consideraciones tales como su estética (local y ambiental) y prever aplicaciones con diversas finalidades, ya sea arquitectónica, comunicacional o artística.
- La tecnología aplicada a la fabricación está muy evolucionada. El desarrollo de los materiales y de las herramientas y procedimientos de trabajo ha cambiado drásticamente; hoy día el procesado numérico es asequible y nos permite transferir a fábrica la información de forma exacta, enviando nuestras intenciones desde la mesa de diseño a la máquina de procesado. El corte mediante troqueladoras, láser o plasma y el fresado o plegado numérico son accesibles a un coste razonable, lo que nos permite desarrollos rápidos y económicamente plausibles.

- El procesado del metal, con la evolución de las herramientas de corte, plegado y soldadura, se aborda de una forma totalmente distinta a la que conocieron los diseñadores hace algo menos de un siglo. Además disponemos de nuevos materiales, como los polímeros plásticos y los sistemas multicapa, con los que podemos fabricar nosotros mismos nuestras piezas, mediante una potente herramienta como es el procesado 3D (impresión digital tridimensional).
- En la actualidad asistimos a la intersección habitual de diferentes disciplinas en el desarrollo de nuestros proyectos. Además los usos y destinos de nuestros diseños han cambiado; la era de la información impone nuevos destinatarios a nuestra desempeño, y usos tan evidentes como "contenedor", "albergue" o "soporte" son en ocasiones secundarios a otros como "visibilidad" o "impacto comunicacional". Además de funcionalidad y eficiencia, se nos requieren valores de innovación visual, impacto escénico... a los que debemos sumar los omnipresentes de reducción de pesos y costes, posibilidad de traslado a diferentes entornos ambientales, capacidad de usos alternativos, etc.

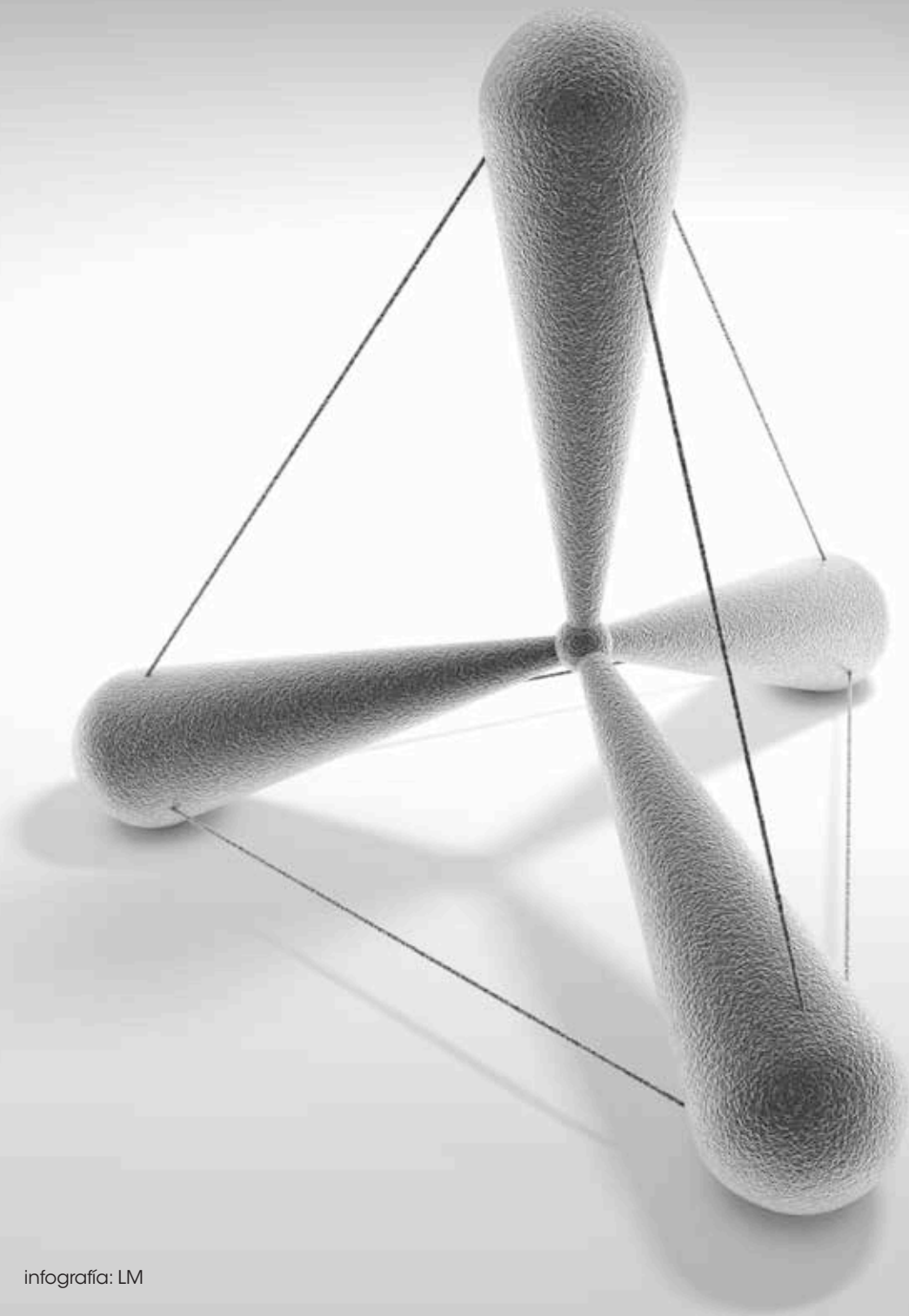
Estos factores (podríamos citar muchas más razones) están impulsando la evolución de nuevos sistemas de mallado tridimensional que –en mi opinión– se aplicarán en el futuro de forma habitual. Teselados superficiales eficientes con mallado interno (relleno) de bajo peso y coste. Contenedores en los que su piel será liviana, modulable e incluso adaptable. Energéticamente eficaces. Sistemas tisulares resueltos mediante aplicación de sistemas fabriles computacionales que trasladarán nuestras intenciones a formas (superficies y volúmenes) que resuelven eficientemente los problemas actuales.

Uno de esos problemas concretos –que por cierto aún está sin solucionar– es el enfoque de los nodos de conexión entre los elementos que conforman una malla. En teoría, hoy día es posible obviar este problema, integrando nodo y barra mediante fabricación en materia continua (mediante impresión o construcción 3D), pero estimo que el diseño de un sistema o estrategia de conexión internodal eficiente tiene muchas utilidades.

No me importa reconocer que Luis Manuel y yo empleamos la mayor parte de nuestro tiempo en investigar en esta materia, en busca de la conexión perfecta que aporte solución a todos nuestros requerimientos: buscamos el conector universal, con un equilibrio perfecto entre solidez y flexibilidad, que nos permita generar estructuras de formas ilimitadas y por supuesto a un coste asequible.

Una de nuestras fuentes de información es el estudio del enlazado molecular del carbono. No hay duda de que la solución es exitosa: la vida conocida es la respuesta a esa cuestión.





infografía: LM

capítulo IV

el secreto del carbono (y de la vida)

Volvamos al inicio del planteamiento de este texto: la relación entre estas formas geodésicas y la arquitectura vital. Nuestra obra *The life's secret* no es más que una alegoría en torno a esa discusión, centrada en el criterio hipotético de que posiblemente exista un esquema espacial común de éxito o que permita la vida tal y como la conocemos.

The life's secret nace así con la ambiciosa pretensión de comunicar, en una sola imagen (en realidad una voluminosa y compleja escultura), un concepto contundente: la posible existencia de un patrón arquitectónico o sintaxis estructural de lo vivo, común a todos los seres de la vida conocida: quizá la selección matemática logró que un punto del espacio definiera una forma exitosa.

Puede parecer chocante este planteamiento, a la vista de gran variabilidad morfológica de los seres vivos. Efectivamente, la estructura y aspecto de la materia viva es tan variable como pueda alcanzar la imaginación; pero sabemos que todo está basado en la combinación de unos pocos elementos y que todos los seres vivos tienen algo en común: todos contienen carbono.

Se estima que en nuestro planeta existen unos dos millones de compuestos, resultantes de distintas combinaciones. Algunas se deben a la unión de solo dos átomos, otros a la conexión de millones; cada elemento posee su particularidad específica para producir compuestos. Algunos nunca se combinan con elementos distintos bajo ninguna circunstancia, como los gases inertes; otros producen solo uno o dos compuestos.

El elemento carbono es distinto a todos ellos. Tiene la capacidad de producir 1.700.000 compuestos. Si se tiene presente el total de compuestos diferentes antes citado, vemos que el resto de los demás elementos producen solamente unos trescientos mil compuestos; por lo tanto, el carbono es la gran maravilla de la naturaleza. No obstante, su cantidad es relativamente pequeña en el planeta Tierra: el carbono representa apenas del 9 al 10 % del peso de los organismos vivientes y solamente la diecisiete cienmilésima parte de la composición de nuestro planeta. Pero, a pesar de ser tan poco abundante, se encuentra en todos los aspectos de nuestra vida, de suerte que ningún otro elemento puede reemplazarlo.

La facilidad con la que el carbono forma compuestos radica en los enlaces que establece. Debido a sus propiedades moleculares, es capaz de combinarse con átomos análogos y también con otros distintos de manera diferente a como lo hacen otros elementos, y además lo puede hacer de varias formas.

Sabemos que el carbono forma uniones muy fuertes con otros átomos de carbono, lo que permite la constitución de moléculas muy grandes y largas. Por ejemplo, los carbohidratos, las proteínas y los ácidos nucleicos son moléculas enormes.

La ciencia invierte mucho esfuerzo en la investigación de la química del carbono porque hasta la fecha no conoce otro elemento que lo remplace. Al ser el silicio el elemento más cercano al mismo, se presumió que, de alguna manera, podría constituir los compuestos formados por el carbono. Pero todos los esfuerzos en tal sentido resultan vanos. La principal razón reside en la muy sólida y estable conexión que forma el carbono con sus propios átomos, lo que permite enlazamientos muchos más largos y muy estables.

Aunque el silicio es un elemento muy cercano al carbono, es incapaz de formar uniones tan potentes con sus propios átomos; establece uniones débiles e inapropiadas para la formación de cadenas largas.

Nevil Sidgwick describe en su libro *Los elementos químicos y sus compuestos* por qué no hay ninguna alternativa al carbono:

"Sabemos suficientemente para estar seguros que es imposible la idea de un mundo en el que el silicio reemplazaría al carbono como fundamento de la vida..."

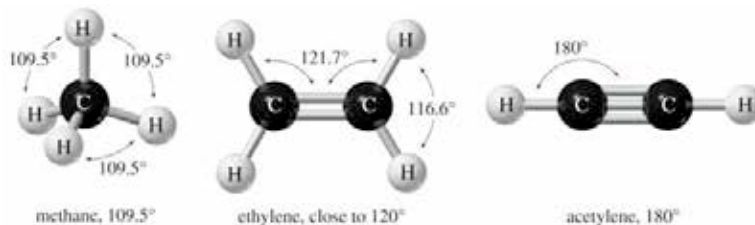
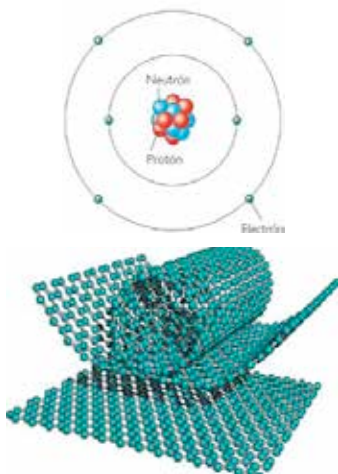
Hasta la fecha, la Tierra es el único planeta conocido que dispone de las condiciones necesarias para que el carbono pueda dar lugar a compuestos estables. En ella el carbono los forma entre un rango de temperatura comprendido entre los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. A menos del límite inferior empiezan a congelarse, en tanto que al sobrepasar el límite superior comienzan a desestabilizarse o desintegrarse. Por ejemplo, al incendiarse un bosque, el calor extremo altera la estructura de los troncos debido a las modificaciones radicales que sufre el carbono; es decir, pierde su estructura original, la que soporta la vida del árbol.

Como vemos, el carbono se deteriora debido a ciertos cambios energéticos; si la temperatura extrema se extendiese por todo el planeta, la vida desaparecería. La temperatura en Venus, ubicado antes que nosotros respecto al sol, ronda los $450\text{ }^{\circ}\text{C}$; en Marte, ubicado justo después que el planeta Tierra respecto al sol, es de alrededor de $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$; en consecuencia, no resulta posible que el carbono forme compuestos implicados en los ciclos vitales.

Las razones de esta diferencia exclusiva a favor del carbono radican en su especial configuración electrónica. No voy a extenderme ni a profundizar en esas cualidades, pero sí a resumir algunas claves.

El átomo de carbono está integrado por un núcleo con 6 neutrones (en ellos reside su peso atómico, fundamentalmente) y 6 protones, en los que reside su carga positiva. En su capa externa dispone de 6 electrones (con carga negativa) que orbitan en diferentes niveles; de forma resumida, en dos; en su capa externa orbitan los cuatro electrones que propician su alta conectividad.

Esos cuatro electrones exteriores pueden interactuar con otros ligandos (otros átomos de carbono u otros elementos) de diferente forma, para lo que el átomo se comporta con variadas geometrías (tetraédrica, triangular planar o lineal) y angulaciones.

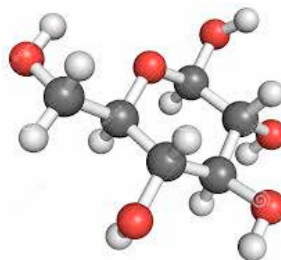
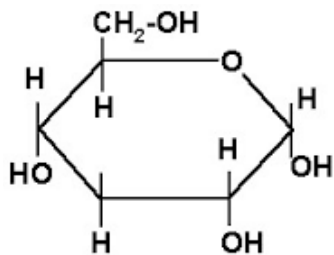


No obstante, el reciente descubrimiento de las buckyesferas y de los nanotubos pone de manifiesto que estas angulaciones no son en absoluto excluyentes. Ya he explicado que la flexión de una lámina hexagonal es posible en una de las direcciones, por alteración del ángulo diedro entre hexágonos colindantes, pero la flexión en forma de esfera exige flexiones hasta hace poco insospechadas o desconocidas en la naturaleza, que implican la integración de pentágonos en su estructura.

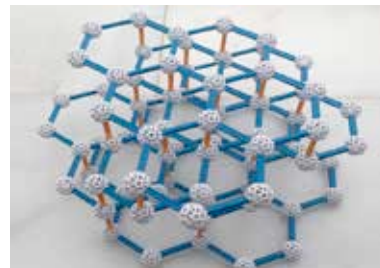
Por ejemplo, en la geometría del fullereno, estructura base de nuestras construcciones esféricas (cúpulas y esferas), aparecen diferentes torsiones que no se corresponden con el "catálogo de angulaciones" que hasta hace poco disponíamos para el carbono.

Los modos de enlazado molecular del carbono afectan drásticamente a sus características químicas y por tanto macroscópicas.

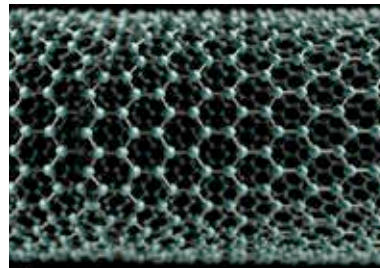
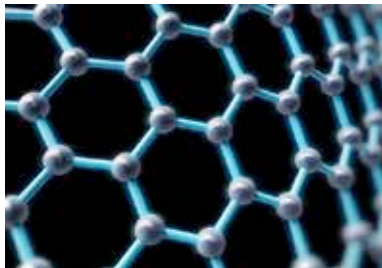
El sistema de enlazado basado en enlaces simples genera formas tetraédricas y supone el enlazado más estable. En los otros dos casos (triangular planar y lineal) los electrones compartidos (tanto en el caso de enlace doble como de enlace triple) forman un nube difusa, resultando que las moléculas son más reactivas. En la naturaleza, la forma molecular más habitual es la primera; es decir, el enlazado tetraédrico, lo que origina formas moleculares preferentemente hexagonales. A modo de ejemplo, la glucosa.



esquema de estructura molecular de la glucosa (modelo plano y de bolas)



modelo de bolas de la estructura molecular del diamante y del grafito (las barras amarillas no son enlaces)
maquetas realizadas en nuestro estudio utilizando el sistema Zometool®



modelo de bolas de la estructura del grafeno y de un nanotubo

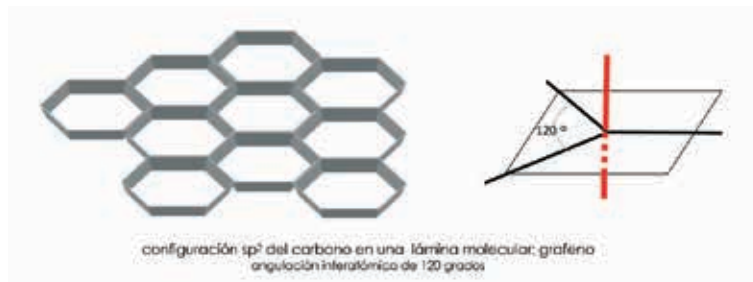
En el diamante, uno de los materiales más duros, la disposición es tetraédrica, generándose hexágonos torsionados; en el caso del grafito, uno de los materiales más blandos, la disposición es hexagonal plana, con láminas paralelas de hexágonos superpuestos. El grafeno es una lámina molecular monocapa de la misma disposición (curiosamente, más duro que el diamante), mientras que en el caso de los nanotubos se trata de una estructura hexagonal curvada y cerrada.

Sabemos que la disposición hexagonal es un conjunto ordenado derivado de la conexión virtual de 6 triángulos equiláteros; el enlazado molecular en forma trigonal (a aproximadamente 120 grados) plano generará láminas planas, mientras que el enlazado tetragonal (a 109 grados) producirá tramas tridimensionales en las que los hexágonos se torsionan ligeramente.

Pero la característica principal de la materia viva (o sea, carbonatada) es la disposición angular en forma triangular (hexágonos y tetraedros). En a+i+d aseveramos que "la vida es triangular", porque la mayor frecuencia del enlazado del carbono es la tetragonal (basada en 4 ligandos), la que permite la generación de las formas tridimensionales que, en suma, somos los seres vivos.

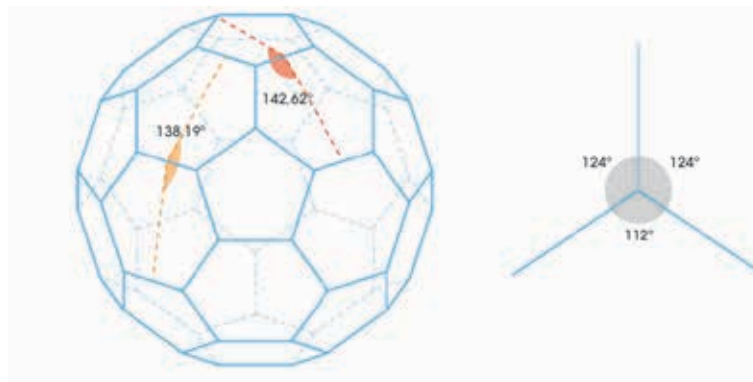
De los cuatro electrones "ligantes" de que dispone el carbono en esa configuración tetraédrica (a la que denominamos sp^3), uno de ellos puede quedar libre, generando una nueva configuración que se denomina sp^2 , de forma que en realidad el electrón sobrante queda cedido a una nube genérica; es decir, no ligado a ningún otro átomo en concreto, sino integrando una nube común que, constituida por todos los electrones "libres", se distribuye por la estructura molecular.

En el caso del diamante se trata de uniones sp^3 o tetraédricas, lo que le otorga su dureza y estabilidad; en el caso del grafito o del grafeno, materiales constituidos exclusivamente por carbono, se trata de uniones sp^2 . También en el caso del fullereno, pero ahora las angulaciones no son planas ni trigonales planares: asombrosamente, los enlaces se "curvan" ligeramente (12 grados en el caso del C_{60}) en el sentido horizontal para generar la forma esférica que hemos descrito a lo largo de este texto.



La gran sorpresa -con el descubrimiento del fullereno- fue encontrar en la naturaleza un material que infringía la angulación planar esperada, hasta entonces constituida por átomos de carbono conectados por angulaciones de 120 grados, en las que el cuarto electrón se incorpora a una nube difusa.

En el caso del fullereno, las angulaciones entre sus aristas son de 124 y 112 grados, dependiendo de que los átomos se encuentren en vértices pentagonales o hexagonales.



Abandonamos el criterio planar del alótropo grafito, en la que las láminas planas se superponen de forma paralela, para aceptar que el carbono, en su configuración sp^2 , puede generar formas curvas. En el fullereno observamos angulaciones de 138,19 y 142,62 grados, en lugar de los 180 grados esperados.

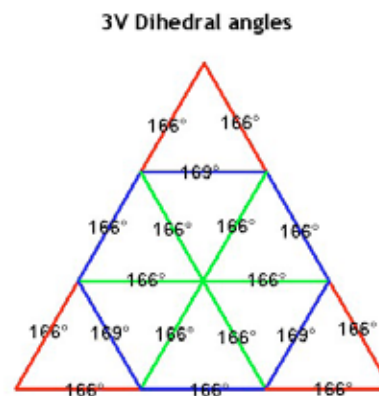
En otros fullerenos (recordemos que se conocen compuestos de entre 32 y 960 átomos), cada uno de ellos ofrece angulaciones distintas. Como explicaba, el reciente descubrimiento de estos nuevos materiales basados en el carbono ha cambiado la perspectiva que disponíamos de la química orgánica.

M. Mallo, en su tesis doctoral ya citada, explica por qué, a pesar de que en arquitectura son habituales las mallas trianguladas, desde hace no más de dos decenios existe más preferencia por las mallas hexagonales:

- Los nodos son más sencillos: los nudos de tres barras son mucho más fáciles de diseñar y fabricar que los nudos de seis barras de las mallas triangulares.
- La teselación hexagonal obtenida genera caras planas; es decir, los polígonos generados mantienen las caras planas, por lo que la construcción es más sencilla.
- Ofrecen coherencia dimensional, de suerte que las células creadas mantienen un radio medio coherente con la optimización derivada del empaquetamiento de esferas.
- Son más ligeras: el patrón genera una estructura más porosa y con menos masa que la malla triangular.
- Respecto a los nudos libres de torsión, el nudo descansa en los ejes donde convergen los tres planos de intersección, por lo que están libres de esfuerzos derivados de la excentricidad geométrica.

A modo de ejemplo les diré que en las conexiones nodales que usamos en nuestras configuraciones de complejidad V3, que como expliqué están inspiradas en los fullerenos, usamos tres tipos de angulaciones horizontales y dos angulaciones verticales.

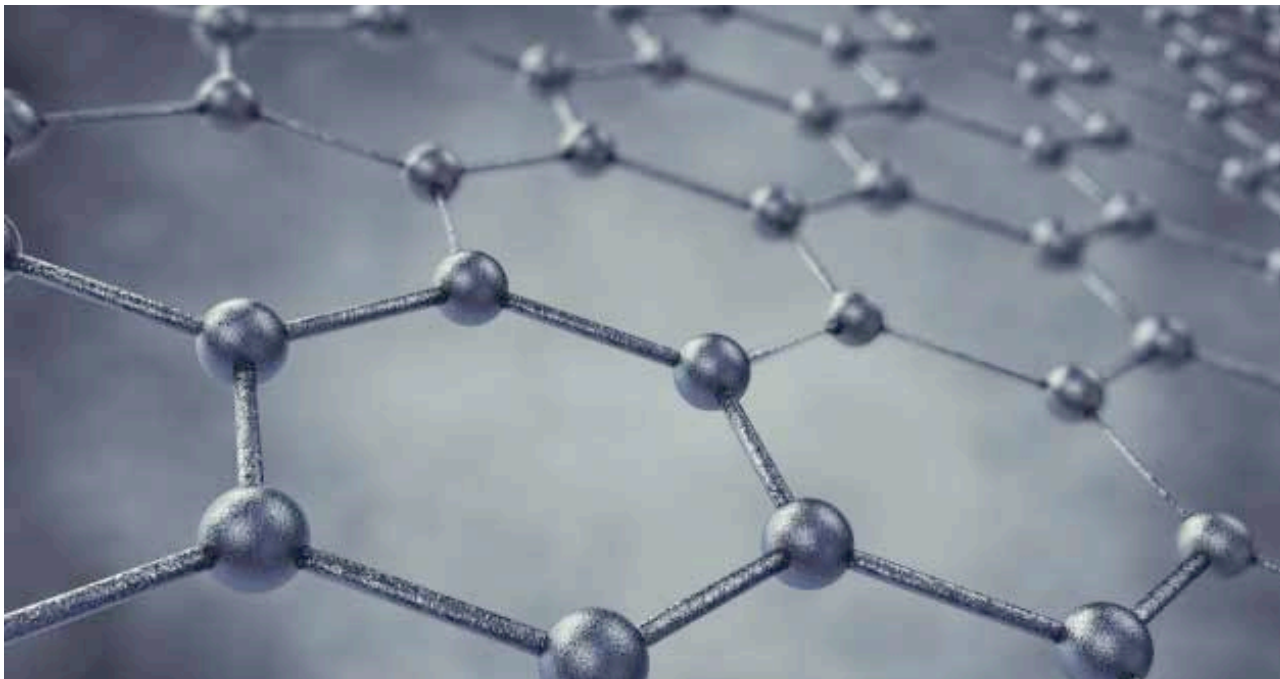
De todo lo expuesto se deriva que el carbono dispone de dos particularidades diferenciales: es "flexible" y evidentemente es altamente sociable -permite la cesión de sus electrones a otro colindante o su incorporación a una nube difusa que se comporta como una "sopa" que cohesiona la estructura molecular genérica a modo de cemento y de piel protectora-.



Estas dos características, la flexibilidad y la generosa capacidad de interrelación se puede resumir en lo que podemos denominar como "versatilidad molecular", una de las bases en las que se fundamenta la capacidad de adaptación -que es, por cierto, una de las formas de definir "inteligencia", aunque no pretendo transmitir con ello que el carbono disponga de esa capacidad-.

Estas particularidades abren grandes posibilidades a nuevas configuraciones moleculares, algunas que desconocíamos hasta ahora y otras que se desarrollarán en el futuro. Debe saber el lector que en estos momentos miles de empresas se encuentran en pleno I+D en relación con estas estructuras moleculares, como los nanotubos, el grafeno y el carbino.

Solo respecto al grafeno, caracterizado como el material del siglo XXI, se observa una importante intensificación en su investigación dentro de la carrera mundial hacia una potencial revolución industrial. Las últimas cifras muestran un importante aumento en las solicitudes de patentes presentadas para reivindicar derechos sobre los diferentes aspectos del grafeno -China lidera el campo como el país con el mayor número de patentes, con un total de 2.204 solicitudes-. Los últimos datos recopilados (2012) por la consultora de patentes del Reino Unido, Cambridge IP y distintas entidades de Estados Unidos, muestran a Estados Unidos con 1.754 solicitudes, a Corea del Sur con 1.160 y al Reino Unido con 54.



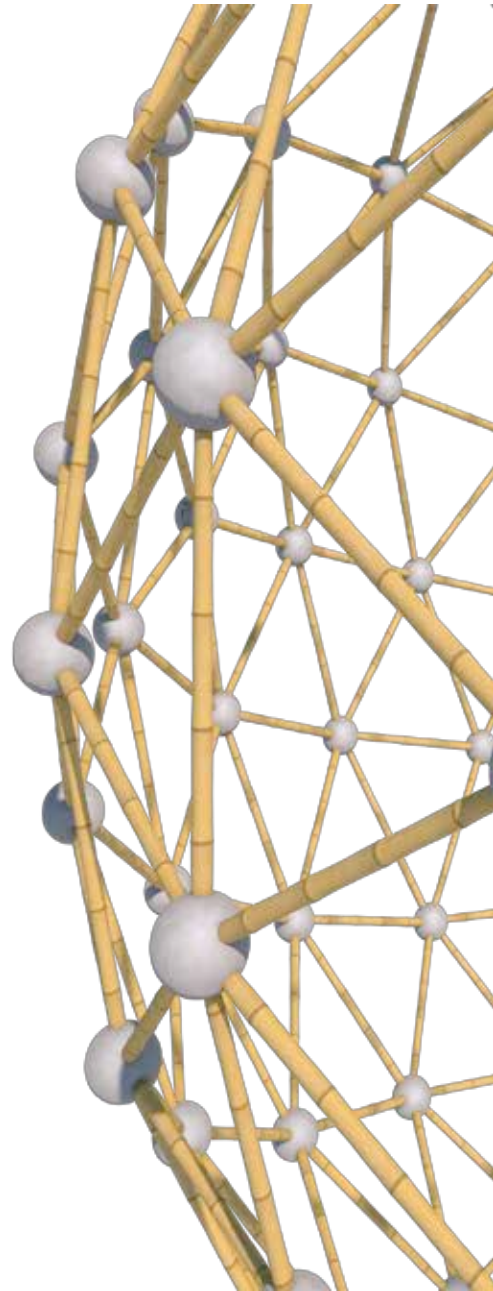
nuestra esfera "the life's secret"

Nuestra intención, con la realización de nuestras esferas geodésicas TLS, es doble; por un lado generar una bella escultura y por otra significar en esa sola figura las características únicas que explican la versatilidad del carbono. Para ello hemos aprendido de sus dos valores diferenciales, la flexibilidad y la conectividad.

La observación de estos valores nos conduce a considerar y aplicar exhaustivamente sus consecuencias al diseño a emplear y a los sistemas y materiales constructivos de nuestras obras finales, eligiendo los materiales adecuados y los sistemas mecánicos que permiten una conectividad eficiente.

Hemos aprendido que los conectores son realmente posicionadores azimutales y que las barras estructurales deben aportar rigidez, disponiendo a su vez de la suficiente flexibilidad que permita su montaje. Sabemos que las construcciones geodésicas, una vez montadas y estabilizadas, se "colapsan" para comportarse como sistemas rígidos y estables; por tanto, hemos de diseñar teniendo en cuenta esas particularidades: conectividad versátil que permita el ensamblaje de elementos sólidos y estables pero dotados de cierta flexibilidad, de suerte que aun cuando los elementos unitarios sean flexibles, el conjunto final ofrezca la rigidez suficiente para mantener la esfericidad y sobre todo una estética digamos... "amable".

Para ello trabajamos a dos niveles bien distintos: en uno de ellos manejamos valores de concepto y percepción, de forma que nuestra obra albergue y comunique nuestras intenciones y mantenga una estética natural. A otro nivel -bien distinto- habremos de resolver cuestiones estrictamente constructivas, generando soluciones tanto a requerimientos estructurales como a algo tan determinante como el proceso de montaje.



El criterio inicial que hemos seguido Luis Manuel y yo fue abordar la pieza escultórica con materiales naturales como la madera, en particular con bambú Gadua. Existen numerosas construcciones cupulares con este material, pero no conocíamos ningún intento de realización de esferas. No parece haber mucha diferencia, pero una cosa es construir una cúpula y otra bien distinta es cerrar una esfera: en este caso el factor gravedad es determinante, en especial a ciertas escalas, al menos y en nuestra experiencia, las superiores a dos metros de diámetro. Además pretendemos que la pieza sea desmontable para ubicarla en diferentes escenarios, estable a la intemperie y por supuesto, de construcción exacta y reproducible.

La particular estructura fibrilar (en el sentido longitudinal) de la madera de bambú dificulta mecanizar los extremos de los tubos de una forma sencilla y asequible, por lo que las conexiones nodales que hemos intentado diseñar no nos garantizan la estabilidad de la estructura, ya que al manipular los extremos de los tubos quedan dañados y su procesado puede provocar la desintegración longitudinal de los largueros estructurales. Hemos testado soluciones que implican su estabilización con diferentes criterios (por ejemplo, el uso de resinas) pero entendemos que este procedimiento es excesivamente agresivo para la configuración de una pieza que pretende disponer de connotaciones de naturaleza y "land art".

Estas cuestiones nos condujeron a elegir un material más asequible y estable, cual es la barra cilíndrica de madera maciza, disponible comercialmente a distintos diámetros estandarizados y homogéneos y a un coste adecuado. La madera de abeto no es cara, es liviana y resistente y nos permite un procesado sencillo, además de ofrecer una estética interesante. Preferimos el formato alistonado (laminado de madera posteriormente procesado en forma de cilindros) que genera cilindros macizos, porque su momento de inercia es suficientemente estable y origina terminaciones más rectas.

El segundo ítem a solucionar es el de los conectores; intentamos conectores de madera, testando algunas estrategias que pasaban por el procesado numérico, pero los costes se disparaban. Así que abrimos de nuevo la caja de las ideas y discusiones (a la que Luis Manuel y yo somos aficionados) en busca del conector perfecto, para llegar, una vez más, al "conector imperfecto".

Definitivamente los planteamos con láminas de aluminio anodizado procesado por corte y plegado numérico, que permitían las diversas angulaciones requeridas, respetaban nuestro criterio de uso de un solo perno por extremo de barra y que -por último- no aportaran peso a nuestra esfera.

Luis Manuel optimizó el diseño con el mínimo material necesario mientras realizábamos pruebas de montaje a escala 1:3 usando como barras estructurales tubos cilíndricos de aluminio, testando los sistemas de construcción que después trasladaríamos a la pieza final. Las pruebas en maqueta funcionaron a la perfección, así que de inmediato nos dispusimos a fabricar los conectores de aluminio (en un excelente proveedor externo, la empresa Extrugasa) y a mecanizar las barras de madera, en nuestro estudio, con la ayuda de un experto carpintero.

También diseñamos el sistema de ensamblaje barra/conector: la estrategia de mecanizado de los extremos de las barras nos permite usar un solo perno por extremo, que para el tamaño de esferas que manejamos decidimos reducir hasta métrica 6 en acero inoxidable (perno roscado pasante + tuerca con arandela de presión). De suerte que, con los materiales que usamos, nuestras esferas disponen de un peso contenido y se pueden instalar en cualquier condición ambiental, ya que los metales empleados resisten la oxidación; las barras de abeto se tratan con barnices pasivantes para instalación en exteriores.

Finalmente ideamos el sistema que emplearíamos en el montaje secuencial de las piezas de arte, que habríamos de plantear para dos situaciones bien distintas: con intención de ubicación sobre suelo o bien para instalación suspendida. También testamos la sistemática de adición sucesiva de piezas, ya que en la fase de montaje se pueden dañar o aparecer deformaciones irreversibles en los conectores, por efecto del propio peso de las piezas.

Para ubicar las piezas en suelo preparamos sencillas peanas de madera de pino tratado con barnices y ceras, que reciben las barras cilíndricas sin dañarlas. Según el tamaño de la esfera, usamos 6 ó 12 soportes, diseñados con una estética próxima y acorde a la de nuestras esferas.



sistema de peanas a suelo independientes, de madera de pino (6 ó 12 units) (AD)

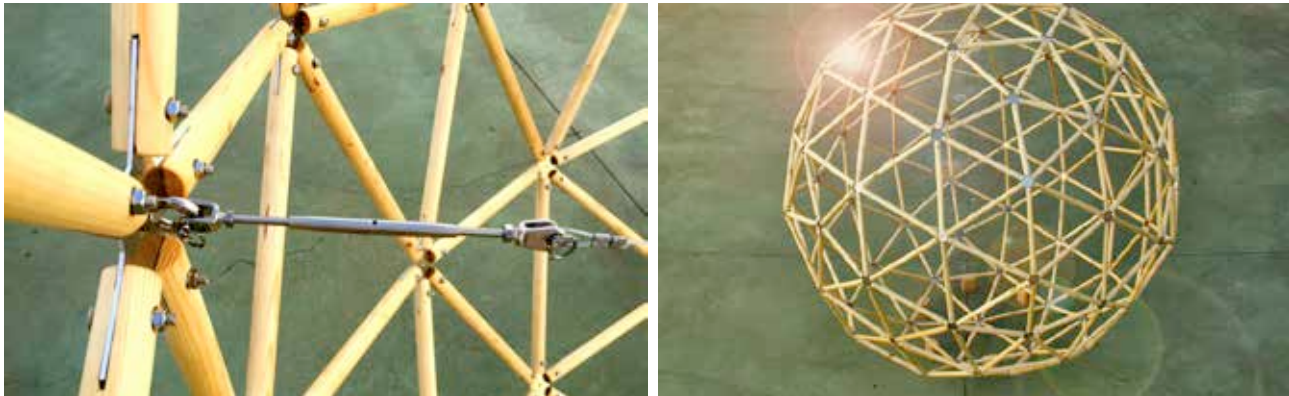
La suspensión de las esferas se realiza desde los nodos equidistantes de alguno de los 20 hexágonos (o de los 12 pentágonos) de nuestra esfera geodésica. Para ello instalamos en esos nodos aros de acero en los que instalamos cables trenzados que confluyen en un único conector de acero. De esta forma evitamos las tensiones subyacentes a la suspensión de la esfera de un solo nodo, que con el tiempo producirían su ovalización por efecto de la gravedad.

Este sistema de suspensión permite modular la altura (actuando sobre la longitud de los cables de acero o añadiendo separadores) o implementar sistemas de rotación, ya sean automáticos (con motorreductores adecuados para giro a bajas revoluciones) o por giro libre, usando desde sencillos "quitavueltas" a dispositivos tipo "swivel", que evitan el rozamiento en las piezas sometidas a giro.



punto de suspensión de 6 vías y cables de suspensión (AD)

Las esferas que construimos disponen de 6 tensores antiovalización. Se trata de cables de acero trenzado con un tensor graduable en uno de sus extremos, que se instalan en los diámetros que conectan los 12 pentágonos de una esfera icosaédrica tipo V3. De esta forma la esfera no se deforma por efecto gravitatorio, ni en instalación sobre base en suelo (por compresión) ni suspendida (por tracción).



Inmediatamente mostramos nuestras esferas al público, aunque el primer montaje (una esfera de 240 cm de diámetro) lo realizamos en nuestro estudio de El Puerto de Santa María (Cádiz), para testar todos los sistemas constructivos y los dispositivos estabilizadores.

A continuación instalamos una esfera de 340 cm de diámetro en el patio de la Academia de Bellas Artes Santa Cecilia de El Puerto de Santa María (Cádiz).



esfera TLS W340 en la Academia de Bellas Artes Santa Cecilia, El Puerto de Santa María, Cádiz

Hasta la fecha de esta edición, nuestra esfera TLS de diámetro 240 cm ha estado exhibida al público en la sala de exposiciones de Clorofila Digital en Madrid (noviembre 2016 a febrero de 2017) y en la exposición "Arte en Femenino" celebrada en el Palacio de la Isla en Cáceres, en marzo de 2017.

El 11 de marzo de 2017 realizamos una instalación en el pequeño atrio del Convento de San Agustín de Badajoz, en el evento denominado "El secreto de la vida", promovido por el Ayuntamiento de Badajoz y producido por Producción Trifásica y nuestro estudio art, investigation & development, y posteriormente (julio 2017) en ArtPuerto, en El Puerto de Santa María (Cádiz).

Se trata de conjugar una instalación de piezas escultóricas y un evento de arte conceptual, luz y sonido, que incluye el montaje de una cúpula geodésica de aluminio de 7,12 m de diámetro y 4,5 m de altura y una esfera de madera de abeto de 3,40 m de diámetro suspendida en su interior.



TLS W240 en ubicación suspendida, en Clorofila Digital (Madrid), 2016



TLS W240 ubicada sobre peanas en la exhibición "Arte en femenino"
Palacio de la Isla, Cáceres, 2017 (F. Pérez)

Reconozco la inspiración del libro de Jorge Wagensberg “Si la naturaleza es la respuesta, ¿Cuál era la pregunta?” para abordar tanto la obra *The life’s secret* como esta publicación. Efectivamente, la propuesta que comparto con Luis Manuel López pretende resumir todo un compendio de cuestiones (por cierto, sometidas a una gran cantidad de incertidumbre) en una sola figura, como si la respuesta a una gran pregunta fuera tan evidente. Pero al contrario que el autor arriba citado, convencido amante de la brevedad, no he logrado no ya resumir, siquiera compilar en breves y claros conceptos, nuestra pretensión de explicar con pocas palabras –o ideas– el significado de la obra.

Percibo que nuestro paseo por los conceptos relacionados con el mallado tridimensional y la geodesia constructiva no ha hecho más que empezar. Las formas regladas que en la actualidad empleamos, basadas en geometrías regulares (como es la icosaédrica) darán paso en breve a espacios en los que el caos (al menos a nivel perceptivo) se observará de manera patente. Aprenderemos a desarrollar nuevas formas, tanto de entender la formulación de espacios como de construirlos en forma de objetos, porque no lo olvidemos: los artistas plásticos lo que hacemos es objetos.

Al igual que en la naturaleza, el orden constructivo se manifiesta en diversidad, en tanta –siguiendo la teoría de Darwin– como sea posible. Los artistas plásticos también nos manifestamos en formas diversas, en tantas como posibilidades disponemos o alcanza nuestra imaginación, porque nuestro camino se nutre de una larga y continua exploración y, por tanto, desconocemos en realidad nuestros próximos pasos. Creamos naturaleza porque somos naturaleza; en realidad, no sabemos hacer otra cosa. Y para ello no es que nos inspiremos, es que literalmente copiamos, ya sea directamente de formas conocidas, ya sean derivadas de estas, filtradas por lo que se denomina experiencia perceptiva del autor.

Mi experiencia perceptiva me indica que todo está por venir. A pesar de llevar ya algunos años en esto de la creación plástica, tengo la impresión permanente de que en realidad hemos avanzado muy poco y de que, por cada paso que damos, las posibilidades se multiplican y el abismo crece. Frente al tópico pesimista de “todo está escrito” pienso que lo más interesante está por ser hallado, comprendido, asumido y aplicado. Sin ir más lejos, hace poco más de 30 años, el ser humano desconocía la existencia de los fullerenos y era impensable la curvatura tridimensional de una lámina mono molecular de carbono, como ocurre con los nanotubos. Debe saber que mientras lee este texto, miles de científicos y desarrolladores, tanto en instituciones públicas como privadas y a lo largo y ancho de nuestro planeta, están investigando y generando nuevas aplicaciones sobre las nuevas propiedades descubiertas en el carbono y sus alótropos.

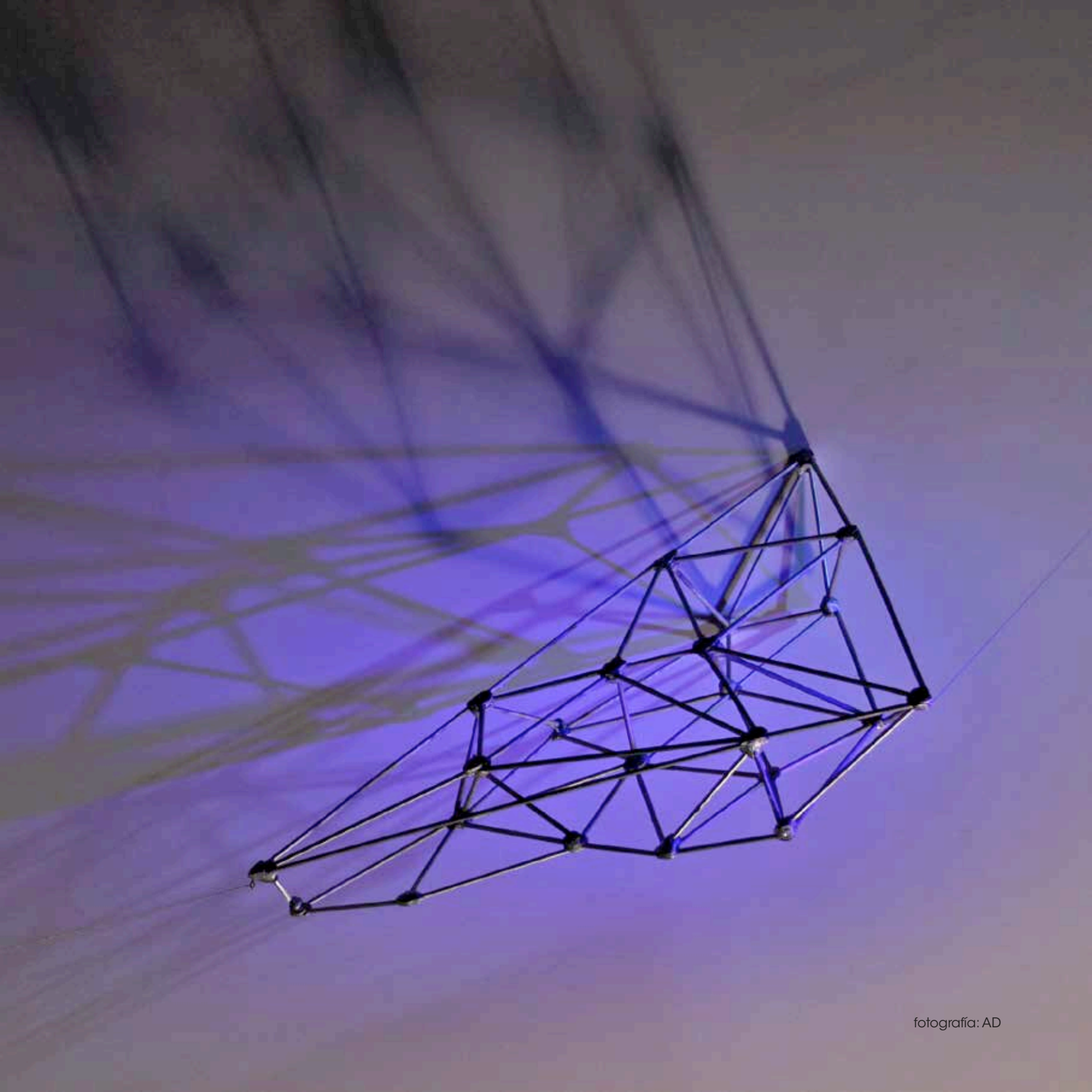
La denominación de mi estudio a+i+d (art, investigation & development) obedece a este criterio de exploración, que intenta conectar íntima e inmediatamente la búsqueda con la realización. ¿Se puede generar conocimiento o ítems incardinados en lo que se denomina I+D+i (investigación, desarrollo e innovación) desde la creación plástica? Sin duda alguna debo responder de forma afirmativa; no hay más que consultar la biografía de muchos creativos, empezando por el mismísimo Leonado da Vinci. La propia sistemática de trabajo de un gran número de artistas contemporáneos, que interseccionan sistemáticamente diferentes disciplinas –no solo en el abordaje conceptual de sus obras, sino en las fases de ejecución y de comunicación de sus proyectos– es otro ejemplo.

Cada vez se aproximan más universos que antes se consideraban ajenos entre sí, como el la arquitectura, el arte, la ingeniería, las matemáticas, la estética o la física. Los conceptos que usan y su conversión en aplicaciones se sumergen ahora en conjuntos comunicables con un sentido conceptual común, cual es analizar, comprender y reintegrar, ahora ya convertidos en nuevas creaciones.

El estudio de superficies malladas, el relleno de volúmenes, el teselado tisular y la generación de formas usando criterios de fragmentación estandarizada ocupará gran parte de futuros programas de investigación y desarrollo a numerosas disciplinas y desarrolladores. Ventajas como el modulado o escalado, el aligerado y la eficiencia o, simplemente, la generación de nuevos paradigmas estéticos y/o formales, justifican esos esfuerzos, sencillamente porque atraen al ser humano, por cuestiones estéticas y de utilidad. Y hoy día esos son valores que se consideran extremadamente valiosos.

En este texto no he querido –por una simple cuestión de espacio y de concreción– referenciar interesantes intervenciones en materia de geodesia e ítems relacionados, como Eden Project (cúpulas geodésicas macladas en Cornwall, Reino Unido) o proyectos conceptuales tan interesantes como Cloud Cities, de Tomás Sarraceno, que tuve la fortuna de conocer en la Hamburger Bahnhof de Berlín en febrero de 2012, ni abordar cuestiones de índole estrictamente arquitectónica o de ingeniería mecánica. Y es que la línea de trabajo que comparto con Luis Manuel se refiere a iniciativas que podríamos incardinar en la investigación básica conceptual, si acaso desarrollada en el campo de la estética y la comunicación. De nuestros resultados se podrán derivar –o no– aplicaciones en otros campos, aunque en realidad, como ya he explicado, a lo que realmente nos dedicamos es a hacer(nos) preguntas.

Concluyo que son estas características de generosidad en la interrelación y de flexibilidad, integrantes de la versatilidad, los valores que debemos extraer de este discurso. Valores de aplicación inmediata y exitosa en todos los ámbitos de la vida, en nuestro desempeño, en nuestro devenir. Habremos de aprender.



bibliografía

Para facilitar la lectura de este texto y no alterar el pretendido formato de narración fluida, he optado por no incluir en el texto las citas numéricas contextuales de las fuentes utilizadas, aunque sí me parece obligado relacionar, a continuación, las principales fuentes consultadas.

- NASA, 2010. Spitzer: **studying the universe infrared**.
http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/news/spitzer20100722.html
<http://legacy.spitzer.caltech.edu>
- H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl & R.E. Smalley: "**C₆₀ Buckminsterfullerene**". Nature 318, Nov 1985.
- Osawa, E.: **Superaromaticity**. Kagaku (Kyoto), 1970, 25: 854-863 (en japonés).
- Becker, L.; Poreda, R. J.; Bada, J. L.: "**Extraterrestrial Helium trapped in fullerenes in the Sudbury impact structure**". Science 272, 5259, 249-252, Apr 12, 1996.
- "**Special issue commemorating the thirtieth anniversary of Eiji Osawa's C₆₀ paper**". J Mol Graph Model. 19(2) 181-274 (2001).
- "**Fullerene from the proterozoic shungite deposit at Kondopoga, Karelia, Russia: Isotopic and spectroscopic studies**". Chinese Science Bulletin 43(S1): 98-98, August 1998.
- Roberts, R. M.: **Serendipia, descubrimientos accidentales en la ciencia**. Ed. Alianza Editorial, Madrid, 2013.
- Solé, R.: **La lógica de los monstruos**. Ed. Tusquets Editores / Metatemáticas. Barcelona, 2016.
- **Buckminster Fuller 1895-1983**. Ed. Arquitectura Viva / Monografías, núm. 143. Madrid, 2010.
- Du Sautoy, M. **Simetría: un viaje por los patrones de la naturaleza**. Ed. Acantilado, Barcelona, 2009.
- Becker, L., Poreda, R. J., Hunt, A. G., Bunch, T. E., Rampino, M.: "**Impact event at the Permian-Triassic boundary. Evidence from extraterrestrial noble gases in fullerene**". Science 23 Feb 2001: Vol. 291, Issue 5508, pp. 1530-1533.
- Becker, L., Poreda, R. J., Bada, J.L.: "**Extraterrestrial helium trapped in fullerenes in the Sudbury impact structure**". Science 272, 5259, 249-252, Apr 12, 1996.
- Rohlfing, E. A., Cox, D. M., Kaldor, A.: "**Production and characterization of supersonic carbon cluster beams**". The Journal of Chemical Physics, Volume 81, Issue 7, 10.
- Christiny, F.: "**La molécula del futuro**". Ciencia al día 1998, num. 1 vol I.
<http://www.ciencia.cl/CienciaAlDia/volumen1/numero1/articulos/articulo4.html>
- Gell-Mann, M.: **El quark y el jaguar**. Ed. Tusquets Editores, Barcelona, 2007.
- Solé, R.: **Vidas sintéticas**. Ed. Tusquets Editores / Metatemáticas, Barcelona, 2012.
- Fernández-Vidal, S.; Millares, F.: **Desayuno con partículas**. Ed. Plaza y Janés, Barcelona, 2013.
- Corbalán, F.: **La proporción áurea, el lenguaje matemático de la belleza**. Ed. Editec, Roderas, 2010.
- Togores Fernández, R., Otero González, C., Díaz Severiano, J. A., Manchado del Val, C.: "**Un procedimiento alternativo para el diseño geométrico de estructuras espaciales**". Grupo Investigador EGICAD, Dto. de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica de la Universidad de Cantabria.
<http://www.togores.net/arquitectura-y-diseno/alternativas-geometricas/procedimiento-alternativo>.
- Eco, U.: **Historia de la belleza**. Ed. Lumen, Barcelona, 2004.
- Mallo, M.: **Sistemas Radiolarios, geometrías y arquitecturas derivadas**. Tesis doctoral, ETSAM, 2015.
- Andreu-Sánchez, C. (2009). "**Neuroestética: cómo el cerebro humano construye la belleza**". En Arocena, C. y Zubiaur, N. (2009). Actas del I Congreso Internacional de Estética Cinematográfica. Bilbao: Universidad del País Vasco. [ISBN: 978-84-9860-269-2].
- Wagensberg, J.: **Si la naturaleza es la respuesta, ¿Cuál era la pregunta?** Ed. Tusquets, Barcelona, 2002.
- Sarraceno, T.: **Clouds cities**. Ed. Distanz, Berlín, 2011.
- Zöllner, F.: **Leonardo de Vinci: obra pictórica completa y obra gráfica**. Ed. Taschen, Khöln, 2003.

publicaciones citadas sobre la obra del autor

- Catálogo "Indicios", de Alfonso Doncel. Ed. Colegio de Arquitectos de Extremadura. Cáceres, 2005.
- Catálogo de la exposición "Pablo Ayer y hoy". Ed. Arzobispado de Mérida-Badajoz. Badajoz, 2009.
- Catálogo "El anillo de Schödinger". Ed. Alfonso Doncel, Badajoz, 2008. ISBN 978-84-611-6956-6
- Catálogo "Simply (a)live". Ed. a+i+d. Badajoz, 2015. ISBN 978-84-606-5657-9.

acceso a vídeos

- DOME'UP promo / Vídeo realizado por The Glow / José María Fernández de Vega
<https://vimeo.com/87666180>
- DOME'UP time lapse / Vídeo realizado por Luis Fano
<https://vimeo.com/33942260>
- El anillo de Schödinger / Vídeo realizado por Luis Fano
<https://vimeo.com/128072970>

agradecimientos

A todos los artistas, creativos, técnicos, profesores y colaboradores con los que he tenido la fortuna de trabajar en estos últimos años y que me han permitido aprender, desarrollar y difundir las obras citadas; también a quienes me han aportado ánimo, soporte, acompañamiento, colaboración y formación. De entre todos y de una forma muy especial a mi compañero y coautor de la obra "The life's secret" Luis Manuel López; también a:

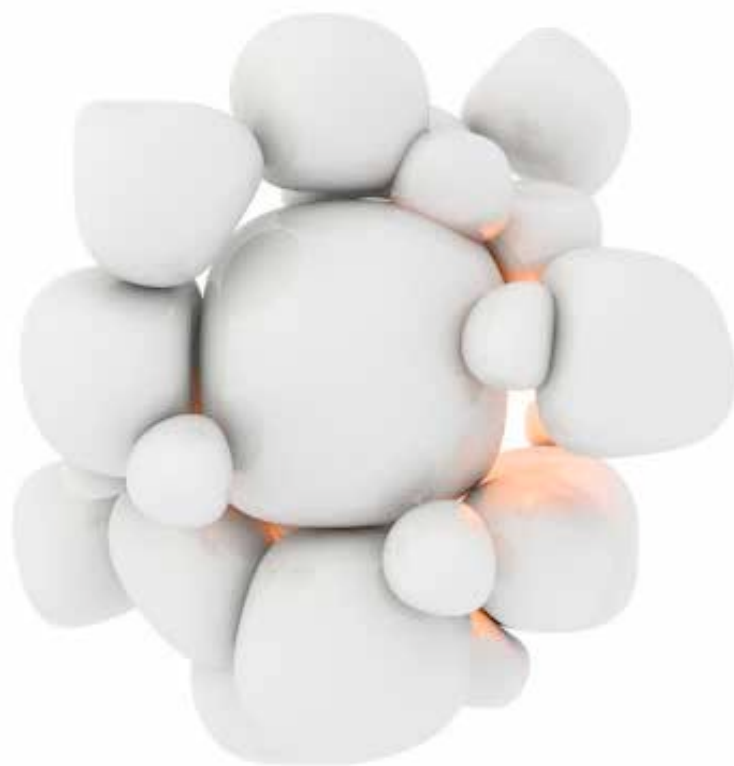
Miguel Ángel Sánchez Javier
José Manuel Fuentes Campo
Javier Cano Ramos
Laura Morala Forte
Pedro Casero Linares
Luis Fano Millán
Arni Giraldo Guareño
Javier Carbonell Espín
Mónica Gandum Martins
Luis Carlos Gallardo
Daniel Almoril Román
José María Fernández de Vega
Abdón Moreno García

Vicente Robles Gil
Ángel Zamoro Madera
Juan Francisco Zamora Cabanillas
Alfonso Doncel Pacheco
Enrique López Diego
Harry Fox
Antonio Chavero Hidalgo
Pilar Mogollón Cano-Cortés
Demetrio Fernández González
Carmen Cebrián González
Francisco José Marín Magán
Lucía González Pérez

Empresas e Instituciones

Talleres Martín, Badajoz
Talleres Málaga, Badajoz
Universidad de Sevilla
Extrugasa
OGESA, SL
The Glow
Indugrafic SL
Indugrafic Digital
Universidad de Extremadura
IES Zurbarán de Badajoz
Del Oeste Producciones SL

Clorofila Digital
Academia de Bellas Artes Santa Cecilia, de El Puerto de Santa María
Escuela de Artes y Oficios Artísticos Adelardo Covarsí, de Badajoz
Ayuntamiento de Badajoz
CCA, El Puerto de Santa María, Cádiz
Fundación Osborne
Trifásica Producciones



más info sobre el autor en

ART PORTFOLIO ■ ALFONSO DONCEL

<https://files.acrobat.com/a/preview/dd38fcb2-82a8-4298-b230-ba1ca2e6fec9>





Si la respuesta es la vida, puede que la pregunta sea si lo vivo observa una determinada configuración espacial común y, si es así, cuál es y por qué es exitosa: si existe una arquitectura vital, siquiera una sintaxis espacial que sirva de base a la vida. ¿Está el Gran Libro de la Naturaleza escrito en idioma geométrico?

Esta obra aborda someramente esta compleja cuestión, cual es si la vida natural, tal y como la conocemos, sigue un patrón espacial y si ese patrón es precisamente el condicionante esencial de su éxito. Una de las posibles respuestas podría resumirse, de forma esquemática y descriptiva, en una única imagen o creación escultórica.

The life's secret (El secreto de la vida) pretende una aproximación al apasionante mundo de la geometría y la geodesia, formulada como un ejercicio de constructivismo geométrico, como técnica creativa y a modo de revisión o análisis conceptual de las claves que soportan la vida tal y como la conocemos: el secreto de la vida en una imagen.

EL AUTOR

alfonso doncel es artista plástico y diseñador. Aunque se declara pintor, a lo largo de su trayectoria ha practicado la escultura, la fotografía, el diseño gráfico y corporativo, la narrativa y las instalaciones, así como ambiciosos proyectos corales, incluida la actividad investigadora; en la actualidad comparte su actividad artística con la de diseñador y director de estrategia y comunicación a través de su estudio **a+i+d** (art, investigation & development).

Con una amplia trayectoria relacionada con el arte conceptual y cognitivo, desarrolla técnicas experimentales tan personales como inconfundibles, utilizando numerosos soportes, técnicas y materiales; compatibiliza trabajos individuales con la dirección de proyectos interdisciplinarios, realizados a modo de espacios de reflexión.

Ubicado actualmente en El Puerto de Santa María (Cádiz, España), hasta la fecha ha expuesto su obra en 70 ocasiones –en 24 de ellas de forma individual– en España y Portugal.