Marlén López
Arquitecta

Ramón Rubio
Dr. Ingeniero Industrial

Miguel Álvaro Bueno
Dr. Ciencias Biológicas

TESIS DOCTORAL

Departamento de Construcción
e Ingeniería de Fabricación.

Universidad de Oviedo.

ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS VIVAS QUE INTERACTÚAN CON SU ENTORNO

Naturalizando el diseño

Hoja de Musa

Marlén López
Architect

Ramón Rubio
Dr. Industrial Engineer

Miguel Álvaro Bueno
Dr. Biologist

DOCTORAL THESIS

Department of Construction and Manufacturing Engineering.

University of Oviedo, Spain.

LIVING ARCHITECTURAL ENVELOPES THAT INTERACT WITH THEIR ENVIRONMENT

Naturalizing design

Musa leaf

Universidad de Oviedo

Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación

TESIS DOCTORAL

ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS VIVAS QUE INTERACTÚAN CON SU ENTORNO

Naturalizando el diseño

LIVING ARCHITECTURAL ENVELOPES THAT INTERACT WITH THEIR ENVIRONMENT

Naturalizing design

AUTORA

Marlén López
Arquitecta
Universidade A Coruña

DIRECTORES DE TESIS

Ramón Rubio García
Dr. Ingeniero Industrial
Universidad de Oviedo

Miguel Álvaro Bueno Sánchez
Dr. en Ciencias Biológicas
Universidad de Oviedo

Agradecimientos

Mi primer agradecimiento es para Ramón, mi director de tesis. Gracias por estar siempre, por ser el mayor impulsor de esta tesis, por confiar en mí y verme progresar en este maravilloso mundo de la investigación. Gracias por tus correos de medianoche. Gracias por explicarme una y mil veces lo que es un JCR y un factor de impacto. Gracias por las gominolas. Gracias por tu paciencia con mi inglés. Gracias por acompañarme a Suiza. Gracias por contar conmigo para tantas cosas. La lista de gracias podría no tener fin. Así que gracias por TODO y más.

A mi otro director, Álvaro, gracias por tu dedicación y esfuerzo. Me siento afortunada y privilegiada por contar con tus consejos, comentarios, ideas y paseos por el Jardín. Gracias por trasmitirme tu pasión por las plantas.

A mi "casi" tercer director, Ben. Gracias por tu alegría y cercanía. Gracias por cuidarme tanto durante mis meses en Londres. Gracias por tu implicación y entusiasmo en esta tesis desde el primer momento.

A todas las personas con las que me he ido encontrando a lo largo de todo este tiempo, que de una u otra forma han contribuido a que este trabajo sea como es. Gracias a Richard Jackson por hacerme partícipe de tus experimentos; a Carlos Magdalena por hacer del mejor y más apasionado guía del KEW; a Julian Vincent por un café lleno de sabiduría; a Marcos Cruz por tus consejos y ánimo en la vida londinense; a Marcelo Fraile por tu cariño y por hacerme partícipe de TRP21; a Tomás Díaz y Mª Ángeles Casado por enseñarme a observar las hojas; a Carlos Caicoya que a pesar de su admiración por esta investigación, tristemente no podrás leerla; a Ilaria Mazzoleni por tu tiempo, lectura y sugerencias; a todos los revisores por sus palabras; y finalmente a Mariel por enseñarme y darme tanto, y especialmente por haberte encontrado y la ilusión de un futuro compartiendo retos.

En lo familiar, no existen suficientes palabras de agradecimiento para expresar la gratitud que siento hacia mi madre, sin la cual la realización de este trabajo nunca hubiera sido posible. Gracias por la comprensión y por el infinito apoyo moral y físico recibido. Gracias por la confianza que siempre has tenido en mí y todos los "líos" en los que me he ido metido a lo largo de los años.

A mis abuelos, por enseñarme a amar la naturaleza.

Al resto de mi familia, por sentir su ánimo y afecto en todo momento.

El último agradecimiento, y el más especial, es para mis dos personas favoritas en cualquier galaxia, conocida o por explorar. A Manu, mi compañero en esta aventura, mi mayor apoyo, gracias por entusiasmarte con esta investigación casi tanto como yo, gracias por tu generosidad e implicación en todos los sentidos. A Rafael, que llegaste a mi vida en la recta final de este trabajo, iluminando los días con tus risas.

Acknowledgements

My first thanks go to Ramon, my thesis director. Thank you for always being, as the main driver of this thesis, to trust me and to see me progress in this research wonderful world. Thanks for your midnight emails. Thanks for explaining me a thousand times what a JCR and an impact factor are. Thanks for the jelly beans. Thanks for your patience with my English. Thanks for joining me in Switzerland. Thanks for counting on me for so many things. The list of thanks may have no end. So thanks for EVERYTHING and more.

To my other director, Álvaro, thank you for your dedication and effort. I feel lucky and privileged for your advice, comments, ideas and walks in the Garden. Thank you for passing on your passion for plants.

To my "almost" third director, Ben. Thank you for your joy and closeness. Thanks for taking good care of me during my months in London. Thanks for your involvement and enthusiasm in this thesis from the outset.

To all the people whom I have been meeting along this time, who in one way or another have contributed to make this work as it is. Thanks to Richard Jackson for making me part of your experiments; to Carlos Magdalena for making the best and most passionate guide of the KEW; to Julian Vincent for a coffee full of wisdom; to Marcos Cruz for your advice and encouragement in London life; to Marcelo Fraile for your care and for involving me in TRP21 project; to Tomás Díaz and Mª Ángeles Married for teaching me to observe the leaves; to Carlos Caicoya that despite your admiration for this investigation, sadly you will not be able to read it; to Ilaria Mazzoleni for your time, reading and suggestions; to all reviewers by their words; and finally to Mariel for teaching and giving me so much, especially I am happy for having found you and sharing an exciting future challenges.

In the family, there are not enough words of thanks to express my gratitude to my mother, without which the realization of this work would never have been possible. Thank you for the understanding and the infinite moral and physical support received. Thank you for the confidence you have always had in me and all the "messes" that I have been getting through the years.

To my grandparents, for teaching me to love nature.

To the rest of my family, to feel their spirit and affection at all times.

The last and the most special thanks is for my two favorite people in any galaxy, known or to be explored. To Manu, my partner in this adventure, my greatest support, thank you for being enthusiastic about this research almost as much as I, thanks for your generosity and involvement in every way. To Rafael, you came to my life in the home straight of this work, illuminating the days with your laughter.

Resumen

El Código Técnico de la Edificación, en su exigencia básica de Ahorro de Energía, cita lo siguiente: *"los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación (...) que puedan perjudicar sus características"*. De lo que se deduce que las envolventes de los edificios tienen un papel importante en la regulación y control del gasto energético, ya que actúan como filtros intermediarios entre las condiciones ambientales externas y los requisitos deseados en el interior.

Sin embargo, a pesar de la idea de envolvente como interfaz reguladora, generalmente los cerramientos se construyen con grandes restricciones que excluyen la interacción con el entorno, la eficiencia energética o la optimización de materiales. Y a pesar de que las características climáticas de cada zona son parámetros variables, las fachadas convencionales tienden a repetir soluciones por ciudades de todo el Mundo, mediante construcciones que no corresponden a los criterios constructivos locales ni a las condiciones climáticas del lugar. Y para suplir esta falta de interacción con el entorno se emplean sistemas que utilizan grandes cantidades de energía para controlar el confort interno, afectando al rendimiento y la eficiencia energética del edificio.

Debido a estas desventajas, observadas en los sistemas empleados comúnmente en las envolventes de los edificios, se sugiere un nuevo tipo de adaptabilidad. Y esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las diferentes condiciones climáticas de una forma pasiva, mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas. Por todo ello, la tesis actual desarrolla una metodología de trabajo que permita entender los principios biológicos de adaptación según términos arquitectónicos y, basándose en ellos, poder generar diseños conceptuales de envolventes para edificios que se adaptan eficazmente a las condiciones climáticas del entorno. Además, se proporciona una clasificación novedosa para organizar los diferentes ejemplos de adaptación considerados de interés en las diferentes áreas climáticas, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas.

Y como parte de la metodología desarrollada, su finalidad es servir como herramienta de utilidad para ingenieros y arquitectos que deseen desarrollar soluciones de envolventes basadas en las estrategias y mecanismos de adaptación de las plantas, seleccionadas por su potencial. Por tanto, la finalidad de este trabajo no es crear un estándar de diseño, sino la creación de conocimiento de soluciones de adaptación de la Naturaleza que ofrecen la posibilidad de ser transferidos a soluciones de diseño para envolventes con capacidad de adaptación a su entorno.

Para la validación de la metodología se generan tres casos de diseño conceptuales de envolvente arquitectónica, basados en diversas adaptaciones de las plantas a los climas fríos, templados o cálidos. Los casos de diseño presentados demuestran, de una forma teórica y conceptual, que sí es posible obtener una mayor adaptabilidad en la construcción de muros exteriores de edificios imitando la Naturaleza frente a las fachadas de los edificios que siguen procesos convencionales.

En definitiva, la metodología "De las plantas a la arquitectura" se presenta como una herramienta útil para ingenieros y arquitectos durante las primeras etapas de diseño en el proyecto constructivo, la cual ayuda a entender cómo se pueden utilizar los principios de adaptación encontrados en la Naturaleza para crear envolventes en edificios. Se trata de una metodología ideada para desarrollar aplicaciones en el sector de la construcción. Pues, aunque en los últimos años se ha comenzado a emplear la biomimética a la arquitectura, existe una limitada disponibilidad de recursos específicos para tal práctica. Mediante la metodología creada se pueden explorar nuevos caminos para lograr el ahorro energético en las edificaciones y contribuir a reducir el impacto ambiental, desde el diseño y comportamiento de la envolvente y su interacción con el medio, y no depender únicamente de sistemas de acondicionamiento interior tal y como se viene haciendo hasta ahora.

Palabras clave: **biomímesis, biomimética, envolvente arquitectónica, adaptación, biología, plantas, estomas, materiales activos, patrones, edificios.**

Summary

The "*Building Technical Code*", in its basic Energy Saving requirement document, collects the following: *"buildings will have an envelope of features such as to limit the energy demand needed to achieve thermal well-being in function of the local climate, the use of the building and the summer and winter seasons; as well as its insulation features, air permeability and solar radiation exposure, reducing the risk of condensation humidity (...) that may damage its characteristics "*. From which it follows that the building's envelopes have an important role in the regulation and control of the energy expenditure, since they act as intermediary filters between the external environmental conditions and the desired requirements in the interior.

However, in spite of this idea of envelope as interface, façades are constructed with great restrictions that exclude interaction with the environment, energy efficiency or optimization of materials. Even though climatic conditions of each zone are variable parameters, the conventional façades tend to repeat solutions by cities around the world with large glazed prisms, which do not correspond to the local aesthetic value or the climatic conditions of the place. To balance this lack of interaction with the environment, systems use large amounts of energy are used to control internal comfort, affecting the performance and energy efficiency of the building.

Due to disadvantages observed in the common systems used in building envelopes, a new type of adaptability is suggested. And this research proposes the adaptability of envelope to different climatic conditions in a passive way, through new biomimetic design challenges based on the abstraction of plant adaptations. Therefore, this thesis develops a working methodology that allows us to understand the biological principles of adaptation according to architectural terms. Using this, we can generate conceptual designs of envelopes for buildings that adapt effectively to the climatic conditions of the environment. In addition, a new classification is provided to arrange different adaptation examples considered of interest in the different climatic areas, with the aim of facilitating the transfer of knowledge from plants' inspiration to development of new architectural solutions. Also, as part of this methodology, its purpose is to serve as a useful tool for engineers and architects who wish to develop envelopes' solutions based on different strategies and mechanisms of plant adaptations, selected by their potential. Therefore, purpose of this work is not to establish a design standard, but to create knowledge of nature-adaptive solutions that offer the possibility of being transferred to design solutions for envelopes that are adaptable to their environment.

For the validation of the methodology, three cases of conceptual design of architectural envelope are generated, based on diverse adaptations of the plants to the cold, temperate or warm climates. The presented design cases demonstrate, in a theoretical and conceptual way, that it is possible to obtain a greater adaptability in the construction of exterior walls of buildings imitating Nature in front of the façades of buildings that follow conventional processes.

In summary, ”From plants to architecture” is presented as a useful tool for engineers and architects during the early stages of design in the construction project, which helps to understand how the adaptation principles found in the Nature to create envelopes in buildings. It is a methodology designed to develop applications in the construction sector. Even though biomimetics have been used in architecture in recent years, there is a limited availability of specific resources for such a practice. New ways are being explored to achieve energy savings in buildings and contribute to reduce the environmental impact, by means of the design and behavior of the envelope and its interaction with the environment, and not rely solely on systems of interior conditioning as has been done so far.

Keywords: **biomimicry, architectural envelope, adaptation, biology, plants, stomata, active materials, patterns, buildings.**

Índice de contenidos

Índice de imágenes xvii

Capítulo 1: Introducción 1

Abstract 3
1.1 Motivación 6
1.2 Objetivos 7
1.3 Hipótesis de partida 8
1.4 Metodología 9
1.5 Estructura de la tesis 11
1.6 Publicaciones 16
Referencias 17

Capítulo 2: Estado del arte 21

Abstract 23
2.1 Introducción 25
2.2 Problemática de partida 26
2.3 Adaptación 29
2.3.1 Adaptación en la envolvente 29
2.3.2 Avances hacia la envolvente arquitectónica adaptativa 31
2.3.3 Adaptación en la Naturaleza 35
2.4 Naturaleza y Arquitectura 36
2.5 Biomímesis 38
2.6 Envolventes arquitectónicas biomiméticas 41
2.6.1 Casos de estudio de proyectos construidos 42
2.6.2 Casos de estudio teóricos 45
2.6.3 Contribución de la tesis: De las plantas a la arquitectura 46
2.7 Soluciones de adaptación en las plantas 47
2.7.1 Morfológica o estructural 47
2.7.2 Fisiológica o funcional 48
2.7.3 Etológica o de comportamiento 48
2.8 Conclusiones 48
Conclusions 49
Referencias 50

Capítulo 3: Naturalizando el diseño 59
Abstract 61
3.1 Metodología biomimética 62
3.1.1 Introducción 62
3.1.2 Procesos en el diseño biomimético 63
3.1.2.1 Proceso de abajo hacia arriba 64
3.1.2.2 Proceso de arriba hacia abajo 65
3.1.2.3 Proceso en "De las plantas a la arquitectura" 66
3.2 Parámetros ambientales 68
3.2.1 Temperatura 70
3.2.2 Humedad 71
3.2.3 Luz 72
3.2.4 Dióxido de carbono 73
3.3 De las plantas a la arquitectura 74
3.4 FASE 1: Biología 75
3.4.1 Clima 75
3.4.2 Exploración de la información biofísica 80
3.5 FASE 2: Transición 83
3.5.1 Abstracción 83
3.5.2 Valoración 86
3.5.2.1 Estomas 86
3.5.2.2 Estomas como mecanismos dinámicos 86
3.5.2.3 Estomas como estrategias estáticas 87
3.5.2.4 Ideas de aplicación 89
3.5.2.5 Innovación 93
3.5.2.6 Generación de diseños conceptuales 93
3.6 FASE 3: Arquitectura 94
3.6.1 Materiales activos 95
3.6.1.1 Materiales activos dinámicos 98
3.6.1.2 Materiales activos estáticos 98
3.6.1.3 Experimentos con materiales activos 98
3.6.2 Diseño adaptativo 99
3.7 Conclusiones 100
Conclusions 102
Referencias 104

Capítulo 4: Climas fríos 111
Abstract 113
4.1 Introducción 115
4.2 Climas 117
4.2.1 Macrobioclima Polar 117
4.2.2 Macrobioclima Boreal 118
4.3 Biomas 119
4.3.1 Bioma Tundra 119
4.3.2 Bioma Taiga 120
4.4.3 Adaptaciones climas fríos 121
4.4 Exploración información biofísica 122
4.4.1 Parámetros ambientales 122
4.4.2 Modelos biológicos 123
4.4.2.1 Temperatura 125
4.4.2.2 Humedad 127
4.4.2.3 Luz 129
4.4.2.4 Dióxido de Carbono 130
4.5 Clasificación de datos 131
4.5.1 Mecanismos dinámicos 131
4.5.2 Estrategias estáticas 132
4.6 Estomas 134
4.6.1 Valoración 134
4.6.2 Estomas como mecanismos dinámicos 135
4.6.3 Estomas como estrategias estáticas 136
4.6.3.1 Materiales y métodos 136
4.6.3.2 Observación 137
4.7 La envolvente en climas fríos 139
4.7.1 Parámetros ambientales 139
4.7.2 Adaptabilidad 141
4.7.3 Soluciones existentes 142
4.8 Generación diseños conceptuales 145
4.8.1 Matriz de diseño 145
4.8.2 Valoración del diseño conceptual 146
4.9 Caso de diseño 1 147
4.9.1 Funcionamiento adaptativo 148
4.9.1.1 Materiales activos dinámicos 151
4.9.1.2 Materiales activos estáticos 152
4.9.2 Diseño adaptativo 154
4.10 Conclusiones 154
Conclusions 156
Referencias 158

Capítulo 5: Climas templados 163
Abstract 165
5.1 Introducción 167
5.2 Climas 169
5.2.1 Macrobioclima Templado 169
5.3 Biomas 171
5.3.1 Bosque templado caducifolio 171
5.3.2 Adaptaciones climas templados 173
5.4 Exploración información biofísica 174
5.4.1 Parámetros ambientales 174
5.4.2 Modelos biológicos 176
5.4.2.1 Temperatura 177
5.4.2.2 Humedad 180
5.4.2.3 Luz 184
5.4.2.4 Dióxido de Carbono 187
5.5 Clasificación de datos 187
5.5.1 Mecanismos dinámicos 187
5.5.2 Estrategias estáticas 189
5.6 Estomas 192
5.6.1 Valoración 192
5.6.2 Estomas como mecanismos dinámicos 193
5.6.3 Estomas como estrategias estáticas 196
5.6.3.1 Materiales y métodos 196
5.6.3.2 Observación 196
5.7 La envolvente en climas templados 199
5.7.1 Parámetros ambientales 199
5.7.2 Adaptabilidad 201
5.7.3 Soluciones existentes 202
5.8 Generación diseños conceptuales 205
5.8.1 Matriz de diseño 205
5.8.2 Valoración del diseño conceptual 208
5.9 Caso de diseño 2 209
5.9.1 Funcionamiento adaptativo 210
5.9.1.1 Materiales activos dinámicos 213
5.9.2 Diseño adaptativo 214
5.10 Conclusiones 215
Conclusions 217
Referencias 219

Capítulo 6: Climas cálidos 223
Abstract 225
6.1 Introducción 227
6.2 Climas 229
6.2.1 Macrobioclima Mediterráneo 229
6.2.2 Áreas mediterránea desérticas 231
6.3 Biomas 233
6.3.1 Bosque y maquia mediterráneos 233
6.3.2 Formaciones vegetales desérticas 235
6.3.3 Adaptaciones climas cálidos 237
6.4 Exploración información biofísica 238
6.4.1 Parámetros ambientales 238
6.4.2 Modelos biológicos 239
6.4.2.1 Temperatura 241
6.4.2.2 Humedad 244
6.4.2.3 Luz 248
6.4.2.4 Dióxido de Carbono 251
6.5 Clasificación de datos 251
6.5.1 Mecanismos dinámicos 252
6.5.2 Estrategias estáticas 253
6.6 Estomas 255
6.6.1 Valoración 255
6.6.2 Estomas como mecanismos dinámicos 256
6.6.3 Estomas como estrategias estáticas 258
5.6.3.1 Materiales y métodos 258
5.6.3.2 Observación 259
6.7 La envolvente en climas cálidos 264
6.7.1 Parámetros ambientales 264
6.7.2 Adaptabilidad 266
6.7.3 Soluciones existentes 267
6.8 Generación diseños conceptuales 268
6.8.1 Matriz de diseño 268
6.8.2 Valoración del diseño conceptual 270
6.9 Caso de diseño 3 272
6.9.1 Funcionamiento adaptativo 273
6.9.1.1 Materiales activos dinámicos 277
6.9.1.2 Materiales activos estáticos 278
6.9.2 Diseño adaptativo 280
6.10 Conclusiones 280
Conclusions 282
Referencias 284

Capítulo 7: Conclusiones 289
7.1 Revisión hipótesis de partida 291
7.2 Discusión final 298
7.2.1 Contribuciones 298
7.2.2 Limitaciones y desafíos 298
7.3 Desarrollos futuros 299

Chapter 7: Conclusions 301
7.1 Research questions revisited. 303
7.2 Discussion 309
7.2.1 Main research contributions 309
7.2.2 Limitations and challenges 310
7.3 Future work. 310

Anexo: Estudio térmico 313

Índice de imágenes

Figura 1.1 Diagrama que ilustra la metodología desarrollada en le tesis. 9
Figura 1.2 Diagrama descriptivo de la organización de la tesis.. 11
Figura 2.1 Fachada del edificio Federal Kluczynski en Chicago, obra de Mies van der Rohe. . 27
Figura 2.2 Detalle del "muro polivalente" ideado por Davies en 1981 31
Figura 2.3 Detalle de los paneles dinámicos de fachada del Instituto Árabe de París 32
Figura 2.4 Edificio Media-TIC con envolvente adaptativa de tecnología ETFE 33
Figura 2.5 Proyecto Eden en Londres. 33
Figura 2.6 Envolvente del estadio Arena en Munich 33
Figura 2.7 Centro nacional acuático en Pekín 33
Figura 2.8 Instalación Bloom como sistema reactivo a los cambios de temperatura. 34
Figura 2.9 Palacio de Cristal obra de Joseph Paxton, 1851 36
Figura 2.10 Patrón estructural de la hoja de *Victoria amazonica* 36
Figura 2.11 Interior casa Batlló, obra de Antoni Gaudí 37
Figura 2.12 Estructura de la cúpula geodésica, Montreal 1967, obra de Buckminster Fuller . . 37
Figura 2.13 Estructura tensada del estadio olímpico de Munich, obra de Frei Otto, 1972. 37
Figura 2.14 Centro Eastgate, en Harare, Zimbabue 38
Figura 2.15 Termitero 38
Figura 2.16 Hojas de la flor de loto. 39
Figura 2.17 Diagrama de líneas y grupos de investigación biología-arquitectura 40
Figura 2.18 Flor de la planta *Strelitzia reginae*. 43
Figura 2.19 Sistema de sombreado basado en el mecanismo Flectofin®. 43
Figura 2.20 Pabellón One Ocean Thematic cuya envolvente se adapta y regula la luz solar. . . 44
Figura 2.21 Detalle del sistema reactivo a la humedad en el pabellón Hygroskin. 44
Figura 2.22 Carencia de desplazamiento tanto en las plantas como en los edificios.. 46
Figura 2.23 Hojas peludas de Gynandriris setifolia como ejemplo de adaptación morfológica. 47
Figura 2.24 Hojas de Echeveria glauca como ejemplo de adaptación fisiológica. 48

Figura 2.25 Hojas de Mimosa pudica como ejemplo de adaptación etológica. 48

Figura 3.1 Diagrama de los principales referentes, conceptos y grupos de investigación que se han tenido en cuenta a la hora de establecer una línea de trabajo. 62

Figura 3.2 Velcro® como ejemplo de proceso biomimético de abajo hacia arriba. 64

Figura 3.3 Rediseño de los trenes de alta velocidad en Japón, como ejemplo de proceso biomimético de arriba hacia abajo. 65

Figura 3.4 Proceso biomimético seguido en "De las plantas a la arquitectura" 66

Figura 3.5 Diagrama de flujo de las diferentes fases a desarrollar en la metodología propuesta.67

Figura 3.6 Parámetros ambientales exteriores (izquierda); funciones de relación exterior-interior a través de la superficie foliar; y variables en el interior de la hoja.. 69

Figura 3.7 Parámetros ambientales exteriores (izquierda); funciones de relación exterior-interior a través de la envolvente; y valores recomendados para proporcionar condiciones de confort interno. 69

Figura 3.8 Diagrama de flujo de las diferentes fases de la metodología propuesta para la generación de diseños conceptuales de envolventes arquitectónicas vivas. 74

Figura 3.9 Mapa Bioclimático de Europa. Rediseñado a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017). 76

Figura 3.10 Bioclimograma de la ciudad española de Gijón (WBCS, 2017) 77

Figura 3.11 Correspondencia entre la clasificación bioclimática de Rivas-Martínez, sus biomas y los capítulos de la tesis. 78

Figura 3.12 Exploración de la información biofísica, siguiendo los criterios de desafío, función y estrategia. 80

Figura 3.13 Diagrama de funciones identificadas para cada parámetro ambiental que resultarán en las diversas estrategias de adaptación de las plantas en cada clima estudiado. 82

Figura 3.14 Diagrama que ilustra la Fase 2: Transición 83

Figura 3.15 Clasificación de datos de los modelos biológicos seleccionados en el proceso de exploración.. 84

Figura 3.16 *Mesembryanthemum,* como ejemplo de mecanismo dinámico a escala macroscópica. 85

Figura 3.17 Hojas de *Rhododendron,* como ejemplo de mecanismo dinámico a escala macroscópica. 85

Figura 3.18 *Fenestraria rhopalophylla,* como ejemplo de estrategia estática a escala macroscópica. 85

Figura 3.19 *Cerastium tomentosum,* como ejemplo de estrategia estática a escala macroscópica. 85

Figura 3.20 *Colocasia esculenta,* como ejemplo de estrategia estática a escala microscópica.. 85

Figura 3.21 Diagrama de los estomas considerados como mecanismos dinámicos. 87

Figura 3.22 Diagrama de los estomas considerados como estrategias estáticas. 87

Figura 3.23 Diagrama del proceso de valoración. 89

Figura 3.24 Diagrama de las funciones según los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de cada zona climática, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. 90

Figura 3.25 Diagrama de las funciones y procesos identificados en la envolvente arquitectónica viva.. 91

Figura 3.26 Diagrama de los dos tipos de funcionamiento adaptativo identificados en la envolvente arquitectónica viva.. 92

Figura 3.27 Diagrama de la adaptabilidad en la envolvente. 94

Figura 3.28 Gráfica de los movimientos, reactivos a la humedad, registrados en un cono de conífera. 96

Figura 3.29 Diagrama de una primera aproximación en la búsqueda de materiales activos . . . 97

Figura 3.30 Geometrías extraídas del análisis de diversos patrones estomáticos. 100

Figura 3.31 Resumen gráfico de la metodología “De las plantas a la arquitectura”. 101

Figura 3.32 The graphic concept of the “From plants to architecture” methodology. 102

Figura 4.1 Mapa de las regiones frías en Europa, macrobioclimas Polar y Boreal. Reelaboración a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017). 115

Figura 4.2 Bioclimograma de Sletnes, Noruega. 117

Figura 4.3 Bioclimograma de Russkaya Gavan, Rusia. 117

Figura 4.4 Bioclimograma de Kuopio, Finlandia. 118

Figura 4.5 Bioclimograma de Yuryevets, Rusia. 118

Figura 4.6 Diagrama de funciones identificadas para cada parámetro ambiental que resultarán en las diversas estrategias de adaptación de las plantas de climas fríos.. 122

Figura 4.7 Diagrama de la exploración de estrategias de adaptación de los modelos biológicos según parámetro ambiental, desafío y función. 124

Figura 4.8 *Salix arctica.* 125

Figura 4.9 *Betula nana.*. 125

Figura 4.10 *Arctostaphylos uva-ursi.* 125

Figura 4.11 *Juniperus communis.* 126

Figura 4.12 *Arctostaphylos alpina.* 126

Figura 4.13 *Silene acaulis.* 126

Figura 4.14 *Saussurea alpina.* 127

Figura 4.15 *Rhodiola rosea.* 127

Figura 4.16 *Pinus sylvestris.* 127

Figura 4.17 *Salix herbacea.* 128

Figura 4.18 *Arctostaphylos uva-ursi.* 128

Figura 4.19 *Pinus sylvestris.* 128

Figura 4.20 *Pinus sylvestris.* 129

Figura 4.21 *Leontopodium alpinum.* 129

Figura 4.22 *Picea abies.* 129

Figura 4.23 *Sphagnum capillifolium.* 130

Figura 4.24 *Saussurea alpina.* 130

Figura 4.25 Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas fríos. 131

Figura 4.26-A Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas fríos. 132

Figura 4.26-B Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas fríos. 133

Figura 4.27 Cierre estomático en plantas de climas fríos. 135

Figura 4.28 *Betula celtiberica, Pinus sylvestris* y *Juniperus oxycedrus* (en orden de izquierda a derecha). 136

Figura 4.29 Estomas de *Betula celtiberica:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x), pelos (10x). 137

Figura 4.30 Estomas de *Pinus sylvestris:* geometría, distribución (10x), distribución (20x). . 138

Figura 4.31 Estomas de *Juniperus oxycedrus:* geometría, distribución (20x). 138

Figura 4.32 Diagrama de los desafíos de las envolventes de las regiones frías, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. 139

Figura 4.33 Diagrama de las funciones a desarrollar por la envolvente de acuerdo a los desafíos definidos en las regiones de climas fríos. 141

Figura 4.34 Radiador fijado a la pared y sala de calderas. 142

Figura 4.35 Diagrama de flujo de la metodología “De las plantas a la arquitectura”. 143

Figura 4.36-A Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas fríos.. 144

Figura 4.36-B Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas fríos.. 145

Figura 4.37 Diagrama de la adaptabilidad de la envolvente en el Caso de diseño 1. 147

Figura 4.38 Representación gráfica abstracta del diseño conceptual de envolvente para climas fríos. 148

Figura 4.39 FAE1 + FAE2 149

Figura 4.40 FAD1 + FAE3 151

Figura 4.41 Experimentos con material termocrómico mediante impresión 3D. 153

Figura 4.42 Patrones estomáticos de las plantas seleccionadas en climas fríos. 154

Figura 5.1 Mapa de las regiones templadas en Europa, macrobioclima Templado. Reelaboración a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017). 167

Figura 5.2 Bioclimograma de Newcastle, Reino Unido. 170

Figura 5.3 Bioclimograma de Lyon, Francia. 170

Figura 5.4 Bioclimograma de Bratislava, Eslovaquia. 170

Figura 5.5 Bioclimograma de Gijón, España.. 171

Figura 5.6 Bioclimograma de Lalín, España. 171

Figura 5.7 Diagrama que ilustra los desafíos a los que tienen que hacer frente las plantas de las regiones templadas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.. 174

Figura 5.8 Diagrama de la exploración de estrategias de los modelos biológicos organizada según parámetro ambiental, desafío y función.. 176

Figura 5.9 *Fagus sylvatica* 177

Figura 5.10 *Daboecia cantabrica* 178

Figura 5.11 *Arctostaphylos uva-ursi* 178

Figura 5.12 *Abies alba* 178

Figura 5.13 *Erica vagans* 179

Figura 5.14 *Rhododendron* 179

Figura 5.15 *Daphne laureola* 179

Figura 5.16 *Fraxinus excelsior* 180

Figura 5.17 *Betula pendula*. 180

Figura 5.18 *Quercus petraea* 181

Figura 5.19 *Fagus sylvatica* 181

Figura 5.20 *Sedum* 182

Figura 5.21 *Taxus baccata* 182

Figura 5.22 *Pinus sylvestris* 182

Figura 5.23 *Hedera helix* 183

Figura 5.24 *Buxus sempervirens* 183

Figura 5.25 *Pinus sylvestris* 183

Figura 5.26 *Pinus sylvestris* 184

Figura 5.27 *Tilia cordata* 184

Figura 5.28 *Ruscus aculeatus* 185

Figura 5.29 *Ilex aquifolium*. 185

Figura 5.30 *Abies alba* 186

Figura 5.31 *Rhododendron* 186

Figura 5.32 *Abies alba* 187

Figura 5.33-A Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas templados. 188

Figura 5.33-B Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas templados. 189

Figura 5.34-A Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas templados. 190

Figura 5.34-B Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas templados. 191

Figura 5.35 Movimientos de apertura y cierre estomáticos. 194

Figura 5.36 Aparato estomático. 195

Figura 5.37 *Fagus sylvatica, Quercus petraea* y *Fraxinus excelsior* (en orden de izquierda a derecha). 196

Figura 5.38 Estomas de *Fagus sylvatica:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x), borde (20x). 197

Figura 5.39 Estomas de *Quercus petraea:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x). . . . 197

Figura 5.40 Estomas de *Fraxinus excelsior:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). 198

Figura 5.41 Diagrama de los desafíos de las envolventes de las regiones templadas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. 199

Figura 5.42 Diagrama de las funciones a desarrollar por la envolvente de acuerdo a los desafíos definidos en las regiones de climas templados. 201

Figura 5.43 Condensación sobre la superficie interior de la ventana y aparato deshumidificador.202

Figura 5.44 Diagrama de flujo de la metodología "De las plantas a la arquitectura". 204

Figura 5.45-A Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas templados. 205

Figura 5.45-B Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas templados. 206

Figura 5.45-C Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas templados. 207

Figura 5.46 Diagrama de la adaptabilidad de la envolvente en el Caso de diseño 2. 209

Figura 5.47 Representación gráfica abstracta del diseño conceptual de envolvente para climas fríos. 210

Figura 5.48 FAD1 211

Figura 5.49 FAD2 + FAE1 212

Figura 5.50 Experimentos con hidrogel 214

Figura 5.51 Patrones estomáticos de las plantas seleccionadas en climas templados. 214

Figura 6.1 Mapa de las regiones cálidas en Europa, macrobioclima Mediterráneo y bioclima desértico. Rediseñado a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017). 227

Figura 6.2 Bioclimograma de Cabo San Vicente, Portugal. 229

Figura 6.3 Bioclimograma de Montepellier, Francia. 229

Figura 6.4 Bioclimograma de Roma, Italia.. 230

Figura 6.5 Bioclimograma de Palermo, Italia. 230

Figura 6.6 Bioclimograma de Madrid, España. 230

Figura 6.7 Bioclimograma de Valencia, España. 230

Figura 6.8 Bioclimograma de Arrecife, Lanzarote. 232

Figura 6.9 Bioclimograma de Cuevas de Almanzora, Almería. 232

Figura 6.10 Bioclimograma de Aguilas, Murcia. 232

Figura 6.11 Diagrama de funciones identificadas para cada parámetro ambiental que resultarán en las diversas estrategias de adaptación de las plantas de climas cálidos. 238

Figura 6.12 Diagrama de la exploración de estrategias de adaptación de los modelos biológicos según parámetro ambiental, desafío y función. 240

Figura 6.13 *Lavandula angustifolia.*. 241

Figura 6.14 *Ammophila arenaria.*. 241

Figura 6.15 *Astragalus balearicus.*. 241

Figura 6.16 *Euphorbia canariensis.* 242

Figura 6.17 *Lithops spp.* 242

Figura 6.18 *Nerium oleander.* 242

Figura 6.19 *Lavandula angustifolia.*. 243

Figura 6.20 *Euphorbia canariensis.* 243

Figura 6.21 *Quercus suber* 243

Figura 6.22 *Juniperus oxycedrus.*. 244

Figura 6.23 *Halimium umbellatum.* 244

Figura 6.24 *Salvia officinalis.*. 245

Figura 6.25 *Cistus ladanifer.*. 245

Figura 6.26 *Quercus ilex.* 245

Figura 6.27 *Erica scoparia.* 246

Figura 6.28 *Euphorbia canariensis.* 246

Figura 6.29 *Agave americana.* 246

Figura 6.30 *Monanthes spp.* 247

Figura 6.31 *Aeonium canariense.* 247

Figura 6.32 *Phlomis italica.* 248

Figura 6.33 *Cistus albidus.* 248

Figura 6.34 *Celtis australis.* 249

Figura 6.35 *Euphorbia handiensis.*. 249

Figura 6.36 *Rosmarinus officinalis.* 249

Figura 6.37 *Nerium oleander.* 250

Figura 6.38 *Lithops spp.* 250

Figura 6.39 *Crassula arborescens.* 251

Figura 6.40 Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas cálidos. 252

Figura 6.41-A Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas cálidos. 253

Figura 6.41-B Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas cálidos. 254

Figura 6.42 Cierre estomático durante el día. 256

Figura 6.43 Mecanismo de apertura y cierre estomático en plantas CAM y plantas C3. 257

Figura 6.44 Fila superior (en orden de izquierda a derecha): *Quercus suber*, *Quercus ilex*, *Pistacia lenticus*, *Cistus albidus.* Fila inferior (de izquierda a derecha): *Lavandula angustifolia*, *Myrtus communis*, *Agave americana, Crassula arborescens*. 258

Figura 6.45 Estomas de *Quercus suber:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). 259

Figura 6.46 Estomas de *Quercus ilex:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). 260

Figura 6.47 Estomas de *Pistacia lenticus:* geometría, distribución (20x). 260

Figura 6.48 Estomas de *Cistus albidus:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). 261

Figura 6.49 Estomas de *Lavandula angustifolia:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). 261

Figura 6.50 Estomas de *Myrtus communis:* geometría, distribución (20x). 262

Figura 6.51 Estomas de *Agave americana:* geometría (haz y envés), distribución (20x) (haz y envés). 262

Figura 6.52 Estomas de *Crassula arborescens:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x). 263

Figura 6.53 Diagrama de los desafíos de las envolventes de las regiones cálidas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. 264

Figura 6.54 Diagrama de las funciones a desarrollar por la envolvente de acuerdo a los desafíos definidos en las regiones de climas cálidos. 266

Figura 6.55 Unidad exterior e interior de sistema de aire acondicionado 267

Figura 6.56 Diagrama de flujo de la metodología “De las plantas a la arquitectura”. 268

Figura 6.57-A Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas cálidos. 269

Figura 6.57-B Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas cálidos.. 270

Figura 6.58 Diagrama de la adaptabilidad de la envolvente en el caso de diseño 3. 272

Figura 6.59 Representación gráfica abstracta del diseño conceptual de envolvente para climas cálidos. 273

Figura 6.60 FAE1+FAE2. 274

Figura 6.61 FAE3.. 275

Figura 6.62 FAD1. 276

Figura 6.63 Experimentos con polímero termo-expansivo. 278

Figura 6.64 Experimentos con material termocrómico mediante impresión 3D. 279

Figura 6.65 Patrones estomáticos de las plantas seleccionadas en climas cálidos. 280

Figura 7.1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta. 293

Figura 7.1 Graphic concept of the “From plants to architecture” methodology. 305

Musa

CAPÍTULO 1

Introducción

"Mi casa es diáfana pero no es de vidrio. Es más bien de la misma naturaleza que el vapor. Sus paredes se condensan y se relajan según mi deseo. A veces las estrecho en torno mío, como una armadura aislante ... Pero otras, dejo que los muros de mis casa se expandan en su espacio propio, que es la extensibilidad infinita."

Georges Spyridaki, Mort lucide, p. 35, Séghers, Paris

CHAPTER 1

Introduction

Abstract

Most definitions of a building façade establish meanings of enclosure or a separation between the interior and exterior, which provides functions of support, control, finishing (aesthetic) and distribution of services. However, it is more interesting to think of the building envelope, without distinction between walls and ceiling, as an interface and not as a separation between the external environmental factors and the internal demands of the occupants (Del Grosso & Basso, 2010). That is, the building envelope seen as an environmental moderator (Wang *et al.*, 2012). Traditionally, it has been thought that buildings reflect the reality of climatic and cultural characteristics through the envelope, as can be seen in vernacular architecture (Zhai & Previtali, 2010). However, the appearance of industrial manufacturing processes in series as well as architectural trends, such as the *International Style*, has filled cities around the world with large glazed prisms, which do not correspond to the local aesthetic value or the climatic conditions of the place (Chávez del Valle, 2002).

The constraints involved in the construction make the envelope a static and inert system, having a direct influence on the performance and energy efficiency of buildings. The energy used in this sector, far exceeds the energy consumption of the industry and transport sectors (Pérez-Lombard *et al.*, 2008), and consequently the construction sector contributes almost one-third of total global greenhouse gas (GHG) emissions (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012).

Different reports highlighting this problem (OECD, 2009a) (IEA, 2008) (Kamal-Chaoui and Robert, 2009), have led urban authorities to develop innovative policy solutions for urban planning and management to reduce global energy demand and GHG emissions (Kamal-Chaoui & Robert, 2009). This is reflected in the way in which the European Union has been developing a large number of Efficiency Programs for Research and Innovation, such as the Horizon 2020 framework (European Commission, 2011). It states that energy efficiency should be elevated to a higher level through *'the consistent application of passive and active design strategies to reduce heating and cooling loads'*, *'increase energy efficiency of equipment'* and *'use of renewable energy'* (Stevanovic, 2013).

Some of these programs focus on the refurbishment of buildings, or the installation of energy-efficient technologies, especially on façades. The best insulation materials, greener energy sources, more efficient financing and better use of information and communication technology are some of the main paths being explored (Skou, 2013). Given the importance of the envelope in the regulation and control of energy waste, it is considered as one of the most vital design parameters. It acts as an intermediary filter between the external environmental conditions and the interior requirements and determines the internal comfort and affects the energy use of the building (Oral & Yilmaz, 2003) (Berkoz & Yilmaz, 1987). The envelope must be able to regulate and manage the environmental parameters of each climatic zone such as temperature, humidity and light, among others. Adaptability in the envelope is sought and therefore Nature is studied as a source of adaptation strategies. Unlike our buildings, which remain inert, living objects respond to the environment and are able to adapt to changing weather conditions (Armstrong, 2012). The biological solutions of adaptation found in Nature are of great interest because they are often complex, multifunctional and highly receptive. The challenge for designers, engineers or architects is the transformation of these interesting biological strategies into successful technological solutions for living architectural envelopes. This dissertation proposes a biomimetic research of the relationship that can be developed between Biology and Architecture in order to offer innovative façade design solutions.

The current research focuses on plants, because they, like buildings, lack movement and remain subject to a specific location. Nevertheless, plants have adapted to the environment developing special means of interaction with changing external issues. The main objective of this thesis is the development of a working methodology that allows us to understand the biological principles of adaptation according to architectural terms. Using this, we can generate conceptual designs of envelopes for buildings that adapt effectively to the climatic conditions of the environment. This methodology is presented as a useful tool for engineers and architects during the early stages of design in the construction project. It helps us to understand how the adaptation principles found in Nature can be used to create envelopes in buildings. New ways are being explored to achieve energy savings in buildings and contribute to reduce the environmental impact, by means of the design and behavior of the envelope and its interaction with the environment, and not rely solely on systems of interior conditioning as has been done so far.

It is important to note that the purpose of this work is not to establish a design standard, but to create knowledge of nature-adaptive solutions that offer the possibility of being transferred to design solutions for envelopes that are adaptable to their environment.

To achieve this purpose, the following objectives are suggested:

· To develop a new design methodology that allows the transfer of biological information to architectural terms.

· To elaborate a classification system of the biological principles of adaptation found in Nature, trying to organize the interesting examples found in different climatic areas for their possible application to architectural solutions.

· To generate conceptual designs for living architectural envelopes that interact with their environment, in the different defined climates.

· To study a possible technical implementation of the designs generated.

The hypothesis addressed in this dissertation is:

"Biomimetics offers design parameters to improve architectural envelopes' climate adaptability".

In order to validate the hypothesis, the following sub-questions are addressed in the subsequent chapters:

· *How can Nature help us in the creation of a new type of exterior building wall capable of adapting and interacting with its environment just like the natural world?*

· *What kind of methodologies, which develop architectural envelopes based on processes and strategies of Nature, have been put forward so far?*

· *What are the main advantages and limitations of these current methodologies in the development of architectural designs inspired by Nature?*

· *Is it possible to generate conceptual designs for building envelope systems that regulate the environmental aspects of each climate zone, based on plant adaptation strategies?*

· *How do we classify and synthesize the adaptation solutions identified in the plants for use by architects and engineers?*

· *What methods of construction have been previously used in the different climatic zones to adapt effectively to the local climate?*

· *Is it possible to obtain greater adaptability in the construction of exterior building walls imitating Nature than following traditional processes?*

· *How do we determine the feasibility of creating an architectural envelope that reacts to different external stimuli and regulates the comfort needs of the interior as if it were a living organism?*

1.1 Motivación

La mayoría de las definiciones de envolvente de un edificio establecen significados de cerramiento o una separación entre el interior y el exterior, que proporciona funciones de soporte, control, acabado (estético) y distribución de servicios. Sin embargo, resulta más interesante pensar en la envolvente del edificio, sin distinción entre muros y techo, como una interfaz y no como una separación, entre los factores ambientales externos y las demandas interiores de los ocupantes (Del Grosso & Basso, 2010), es decir la envolvente del edificio como un moderador ambiental (Wang *et al.*, 2012). Tradicionalmente se ha buscado que los edificios reflejen la realidad de las características climáticas y culturales a través de la envolvente, tal y como se puede observar en la arquitectura vernácula (Zhai & Previtali, 2010). Sin embargo la aparición de los procesos de fabricación industrial en serie sumado a tendencias arquitectónicas como el *Estilo Internacional* desarrollado durante la primera mitad del siglo XX, ha repartido por ciudades de todo el Mundo grandes prismas acristalados, o cajas de acero y vidrio, que no corresponden a los valores estéticos locales ni a las condiciones climáticas del lugar (Chávez del Valle, 2002).

Los condicionantes descritos hacen de la envolvente un sistema estático e inerte, responsable directa en el rendimiento y la eficiencia energética de los edificios, sobrepasando el consumo energético por parte de los sectores de la industria y transporte (Pérez-Lombard *et al.*, 2008), y en consecuencia, el sector de la construcción contribuye en casi un tercio del total de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012). Diferentes informes que redactan este problema (OECD, 2006) (OECD, 2009a) (OECD, 2009b) (IEA, 2008) (Kamal-Chaoui & Robert, 2009) han llevado a las autoridades urbanas a desarrollar soluciones políticas innovadoras de planificación y gestión urbana para reducir la demanda mundial de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (Kamal-Chaoui & Robert, 2009). Esto se refleja en la forma en que la Unión Europea ha estado desarrollando un gran número de programas de fomento de la eficiencia para la investigación y la innovación, como el marco Horizonte 2020 (European Commission, 2011), donde se propone que la eficiencia energética sea elevada a un nivel superior a través de *«la aplicación coherente de estrategias de diseño pasivas y activas para reducir las cargas de calefacción y refrigeración», «aumentar la eficiencia energética de los equipos»* y *«el uso de energías renovables"* (Stevanovic, 2013). Algunos de estos programas se centran en la rehabilitación de edificios, o en la instalación de tecnologías de eficiencia energética, especialmente en fachadas. Los mejores materiales de aislamiento, fuentes de energía más ecológicas, una financiación más eficiente y un mejor uso de la tecnología de la información y la comunicación son algunos de los principales caminos que se están explorando (Skou, 2013).

Dada la importancia de la envolvente en la regulación y control del gasto energético, se considera ésta como uno de los parámetros de diseño más importantes, pues determina el confort interno y esto afecta al uso energético del edificio (Oral & Yilmaz, 2003)(Berkoz & Yilmaz, 1987). La envolvente debe ser capaz de regular y administrar los parámetros ambientales de cada zona climática como la temperatura, la humedad y la luz, entre otros.

En esta investigación se busca la adaptabilidad en la envolvente y se recurre a la Naturaleza como fuente de estrategias de adaptación. A diferencia de nuestros edificios, que permanecen inertes, los objetos vivos responden al ambiente y son capaces de adaptarse a las cambiantes condiciones del clima (Armstrong, 2012). Por ello, las soluciones biológicas de adaptación encontradas en la Naturaleza son de sumo interés debido a que a menudo son complejas, multifuncionales y altamente receptivas. El desafío para los diseñadores, ingenieros o arquitectos es la transformación de las estrategias biológicas encontradas de interés, en soluciones tecnológicas exitosas de envolventes arquitectónicas vivas.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de la tesis es el desarrollo de una metodología de trabajo que permita entender los principios biológicos de adaptación según términos arquitectónicos y, basándose en ellos, poder generar diseños conceptuales de envolventes para edificios que se adaptan eficazmente a las condiciones climáticas del entorno. Se presenta esta metodología como una herramienta útil para ingenieros y arquitectos durante las primeras etapas de diseño en el proyecto constructivo, la cual ayuda a entender cómo se pueden utilizar los principios de adaptación encontrados en la Naturaleza para crear envolventes en edificios, explorando así nuevos caminos para lograr el ahorro energético en las edificaciones y contribuir a reducir el impacto ambiental, desde el diseño y comportamiento de la envolvente y su interacción con el medio, y no depender únicamente de sistemas de acondicionamiento interior tal y como se viene haciendo hasta ahora. Es importante señalar que la finalidad de este trabajo no es crear un estándar de diseño, sino la creación de conocimiento de soluciones de adaptación de la Naturaleza que ofrecen la posibilidad de ser transferidos a soluciones de diseño para envolventes con capacidad de adaptación a su entorno.

Para alcanzar este propósito, los objetivos parciales que se pretenden conseguir en este trabajo son los siguientes:

- Desarrollo de nueva metodología de diseño que permita realizar la transferencia de la información biológica a términos arquitectónicos.

- Elaboración de un sistema de clasificación de los principios biológicos de adaptación encontrados en la naturaleza, tratando de organizar los ejemplos de interés encontrados en las diferentes zonas climáticas para su posible aplicación a soluciones arquitectónicas.

- Generación de diseños conceptuales para envolventes arquitectónicas vivas que interactúan con su entorno, en los diversos climas definidos.

- Estudio de una posible implementación técnica de los diseños generados.

1.3 Hipótesis de partida

La hipótesis de partida de esta tesis es la siguiente:

> *"La biomimética ofrece parámetros de diseño que mejoran conceptualmente la adaptabilidad al clima de las envolventes arquitectónicas ".*

Para responder a esta hipótesis, se han planteado las siguientes cuestiones:

- *¿Cómo puede la naturaleza ayudarnos en la creación de un nuevo tipo de cerramiento exterior de edificios capaz de adaptarse e interactuar con su entorno al igual que lo hacen las envolventes del mundo natural?*

- *¿Qué tipo de metodologías, que desarrollen envolventes arquitectónicas basadas en procesos y estrategias de la naturaleza se han realizado hasta el momento?*

- *¿Cuáles son las principales ventajas y limitaciones de dichas metodologías actuales, en el desarrollo de diseños arquitectónicos inspirados en la naturaleza?*

- *¿Es posible generar diseños conceptuales para sistemas envolventes de edificios que regulen los aspectos ambientales de cada zona climática, basándose en estrategias de adaptación de las plantas?*

- *¿Cómo clasificar y sintetizar las soluciones de adaptación identificadas en las plantas para su uso por arquitectos e ingenieros?*

- *¿Qué métodos de construcción se han utilizado previamente en las diferentes zonas climáticas para adaptarse de forma eficaz al clima local?*

- *¿Es posible obtener una mayor adaptabilidad en la construcción de muros exteriores de edificios imitando la naturaleza frente a las fachadas de los edificios que siguen procesos tradicionales?*

- *¿Cómo determinar la viabilidad de la creación de una envolvente arquitectónica que reacciona a los diferentes estímulos externos y regula necesidades de confort del interior como si de un organismo vivo se tratase?*

1.4 Metodología

La investigación presentada se aborda desde el análisis de las estrategias de adaptación de las plantas a su entorno y su transferencia a innovaciones tecnológicas para envolventes en edificios. Para entender cómo se pueden utilizar los principios de adaptación de las plantas para crear envolventes en edificios, la metodología propuesta se aborda desde dos aproximaciones principales: la primera se refiere a la naturaleza y cómo identificar esas estrategias y mecanismos de adaptación de las plantas en las diferentes zonas climáticas definidas. La segunda se refiere a la arquitectura y la forma de abstraer y transformar las ideas seleccionadas en posibles y potenciales soluciones innovadoras para los edificios.

La aproximación desde la Naturaleza se relaciona con conceptos más analíticos y científicos, que se combina y complementa con la aproximación desde la Arquitectura, más deductiva y creativa. La convergencia de los requerimientos en la envolvente del edificio con las soluciones de adaptación encontradas en la Naturaleza apuntan hacia la creación de diseños conceptuales para un nuevo tipo de envolvente viva, capaz de regular los aspectos ambientales para obtener el confort interno.

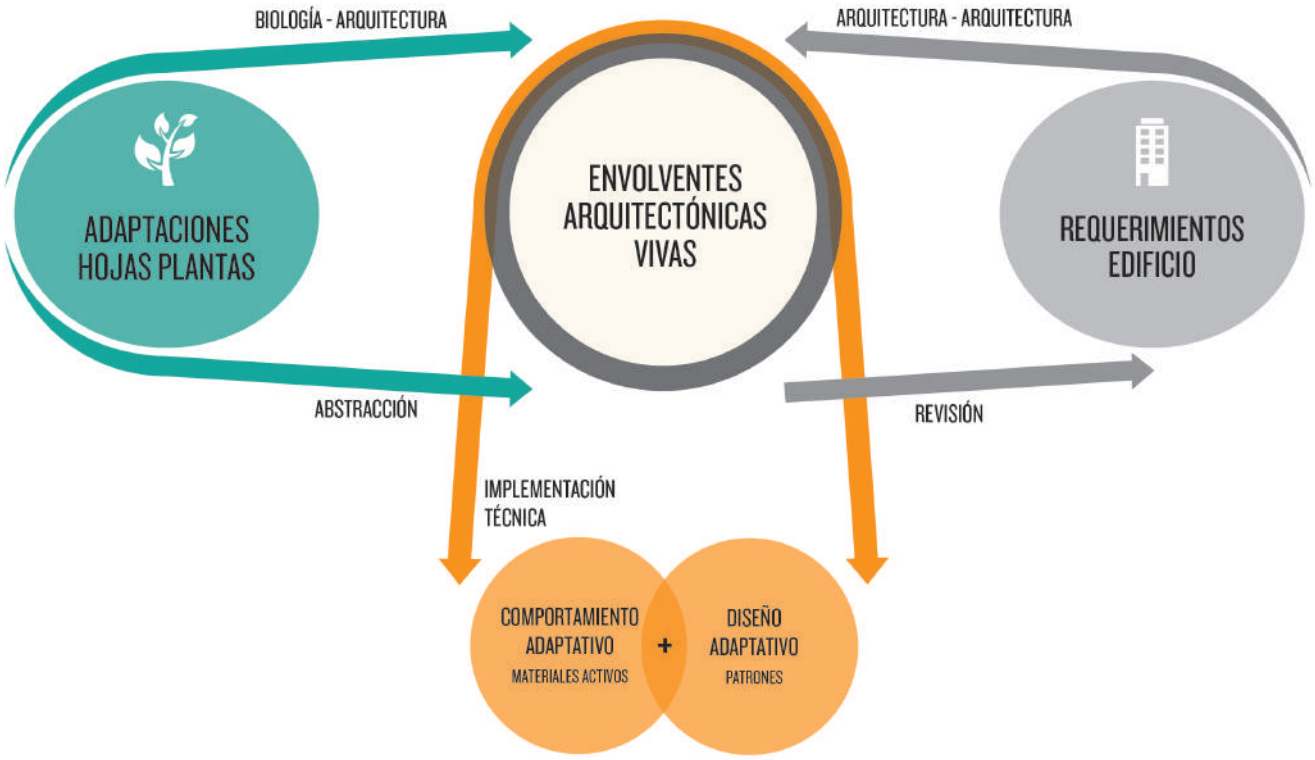


Figura 1.1
Diagrama que ilustra la metodología de dieño desarrollada en le tesis.

La metodología de diseño creada a lo largo de esta investigación, llamada "De las plantas a la arquitectura", se ilustra en la Figura 1.1.

Dado que la gestión, categorización y organización de la información biofísica en la naturaleza supone un gran desafío, se propone un primer acercamiento a través de una recopilación de datos de diferentes soluciones de adaptación de las plantas a su entorno, dado su interés para una posible aplicación al diseño de envolventes en edificios. Con esta clasificación tratamos de organizar la mayoría de los ejemplos de interés encontrados en diferentes áreas climáticas en Europa. Se proporciona así una visión global de las adaptaciones de las plantas, organizando dicha colección de datos según el tipo de clima y los aspectos ambientales (temperatura, humedad, luz o dióxido de carbono). Una vez realizada la clasificación de datos, se sugiere una metodología de diseño biomimético, que conduce a diseños conceptuales para el desarrollo de envolventes arquitectónicas capaces de adaptarse e interactuar con su entorno. La metodología facilita la transferencia entre la información biológica y la aplicación arquitectónica: de las plantas a la arquitectura, de la biología a la ingeniería. Con el fin de lograr dicha transferencia y a su vez los principales objetivos de la investigación, se realizan las siguientes etapas de trabajo:

- Revisión literaria de los principales campos de investigación sobre las envolventes arquitectónicas y sus avances en términos de adaptación. Análisis de diferentes proyectos construidos en los últimos años, además del estudio y comparación de otros trabajos de investigación académica.

- Exploración de las diferentes estrategias biológicas de adaptación de las plantas con su entorno, según los aspectos ambientales temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

- Síntesis de la información seleccionada en una clasificación de datos para posibles desarrollos con potencial innovador, proporcionando así una herramienta de trabajo accesible a ingenieros y arquitectos.

- Generación de diseños conceptuales para envolventes en edificios, y experimentación a través de nuevas tecnologías de fabricación con materiales activos para su implementación técnica.

1.5 Estructura de la tesis

La redacción de la tesis se ha estructurado en siete capítulos, cuyo contenido se explica a continuación. Se incluye una representación esquemática de la organización del trabajo en la Figura 1.2

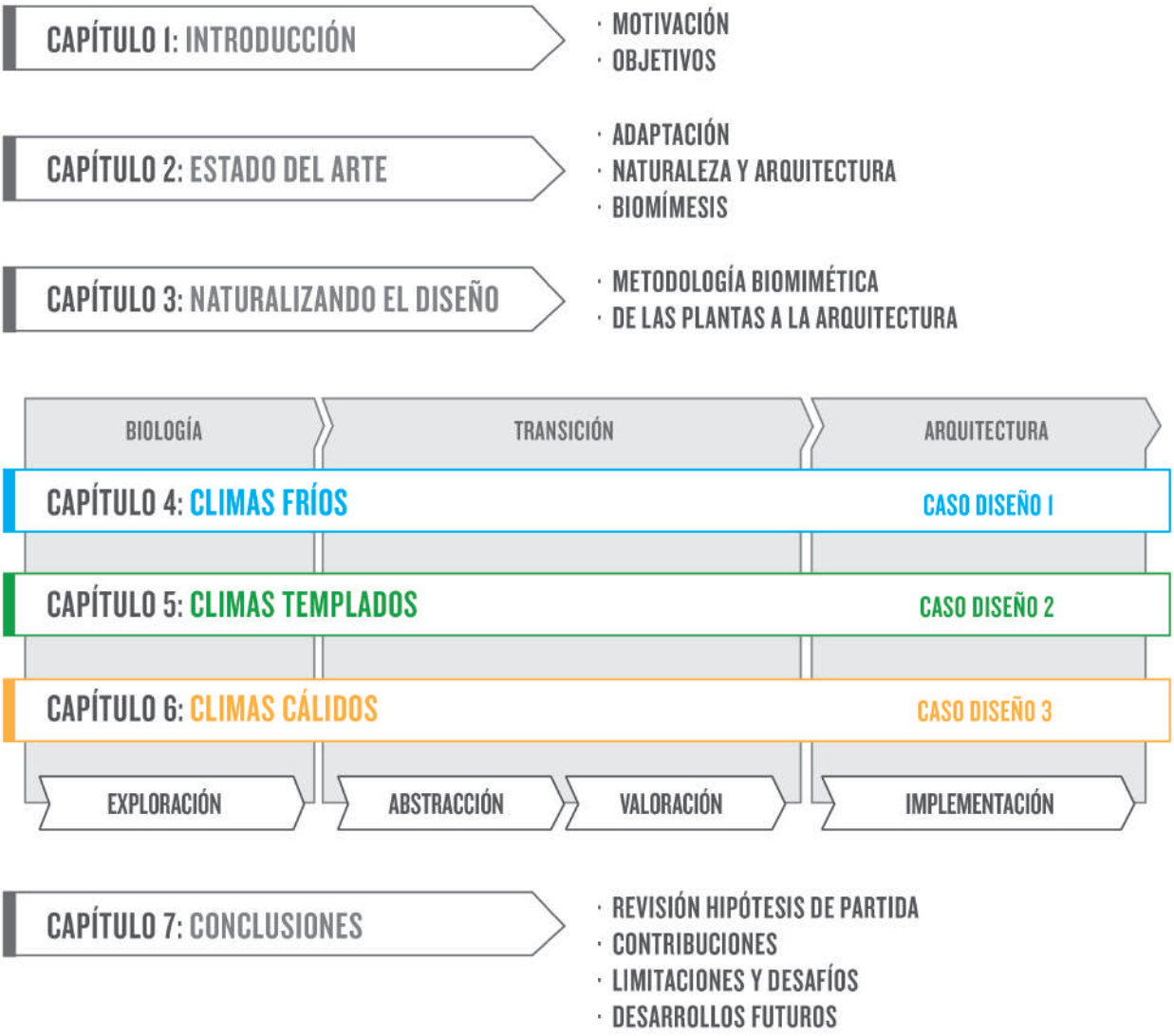


Figura 1.2
Diagrama descriptivo de la organización de la tesis.

CAPÍTULO 1: Introducción

Este capítulo contiene una descripción general que justifica la realización de esta tesis, los objetivos que se plantean alcanzar con las preguntas a las que tiene que responder para lograr tal fin, el procedimiento de trabajo y los medios utilizados para el desarrollo.

CAPÍTULO 2: Estado del arte

En este capítulo se ha expuesto la revisión literaria de los principales campos de investigación que afectan al dominio del trabajo: las envolventes arquitectónicas y sus avances en términos de adaptación. Se estudian los antecedentes, que desde el siglo pasado han surgido paulatinamente como diferentes propuestas de diseño para fachadas más activas y menos estáticas, fachadas cinéticas como sistemas de control ambiental, capaces de responder a diferentes aspectos ambientales cambiantes. Un resumen de las definiciones sobre envolventes arquitectónicas adaptativas en la literatura es revisado y se determina el significado de envolvente arquitectónica viva, dentro del alcance de esta investigación, como aquella que responde y gestiona las condiciones ambientales cambiantes tanto interiores como exteriores. Las envolventes arquitectónicas vivas tienen la capacidad de cambiar con el tiempo a través de estrategias de adaptación para anticiparse a las variaciones ambientales exteriores, así como a las actividades interiores y sus interacciones con los usuarios.

En la segunda parte del capítulo se repasa la relación de la naturaleza como fuente de inspiración en la Arquitectura y se aborda el concepto de biomímesis, explicando las aplicaciones de esta nueva ciencia en el campo de la construcción y más concretamente en la generación de envolventes, principal tema de estudio de esta investigación. Además de la revisión de diferentes proyectos construidos en los últimos años, otros trabajos de investigación académica son analizados y comparados, incluyendo la contribución de la tesis.

CAPÍTULO 3: Naturalizando el diseño

A lo largo del tercer capítulo se presenta la metodología para el diseño conceptual de envolventes arquitectónicas vivas basadas en las adaptaciones de las plantas a los diferentes climas, acotando el análisis a especímenes propios de Europa, pues el territorio europeo alberga todos los grandes grupos climáticos a excepción del tropical, quedando representada una amplia gama de ejemplos de zonas frías, templadas y cálidas. Se toma como referencia la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017) y se explica esta elección en comparación con otras clasificaciones disponibles en la literatura. Una vez definidos los datos climáticos de cada zona, se desarrolla la fase de exploración de la información biofísica, como una fase de indagación y recogida de ejemplos de adaptaciones de las plantas al entorno, a través de la definición de diferentes desafíos y funciones, según los parámetros ambientales temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono como parámetros variables en el tiempo y el lugar.

Tras esta recogida de datos, se organizan y ordenan los modelos biológicos explorados, de acuerdo a una clasificación propuesta que divide los sistemas estructurales de adaptación de las plantas en dos grupos: mecanismos dinámicos o estrategias estáticas, en cada zona climática y para cada parámetro ambiental seleccionado. La valoración es el siguiente paso en la metodología propuesta "De las plantas a la arquitectura", y trata de seleccionar ideas con potencial de aplicación al desarrollo de envolventes arquitectónicas. Dichas ideas sugieren un nuevo tipo de adaptabilidad para la envolvente, la cual se alcanza a través del funcionamiento adaptativo y el diseño adaptativo, conceptos que introducen en la parte final del capítulo.

CAPÍTULO 4: Climas fríos

Los capítulos 4, 5 y 6 tienen una estructura similar, correspondiéndose cada uno de ellos con las diferentes regiones climáticas europeas estudiadas. Cada capítulo se estructura en las siguientes partes (véase Figura 1.2):

Fase 1: Biología

Esta primera fase aborda el estudio de los datos climáticos generales y sus biomas; el estudio y análisis de las plantas más representativas y sus adaptaciones al entorno; y la exploración de la información biofísica.

Fase 2: Transición

La segunda fase trata de conectar la información biológica estudiada con el desarrollo de aplicaciones arquitectónicas. Para ello se realiza una clasificación de los modelos biológicos explorados según mecanismos dinámicos o estrategias estáticas; una valoración de los sistemas obtenidos; y por último se desarrolla la generación de diseños conceptuales según los requerimientos de las envolventes en cada zona climática.

Fase 3: Arquitectura

Finalmente, en la tercera fase se desarrolla un caso de diseño de envolvente para cada zona climática, valorando sus posibles materializaciones.

Se comienza, en el capítulo 4, con los climas fríos correspondientes a los macrobioclimas Polar y Boreal. Sus biomas Tundra y Taiga están representados en Europa en su zona más septentrional a lo largo de una franja costera del Océano Ártico y las costas escandinavas (Tundra) y una amplia franja entre los océanos Pacífico y Atlántico, más oceánica hacia Escandinavia (Taiga). Este capítulo también recoge los climas de alta montaña, localizados en las altas montañas de todo el mundo. Se detallan diversas variables, incluyendo temperatura, precipitación y humedad, información particularmente relevante como elemento introductorio al análisis biológico así como a la propuesta arquitectónica. En la fase de exploración de la información biofísica se analizan diferentes especímenes de plantas con el objetivo de entender sus estrategias biológicas de adaptación a las bajas temperaturas, el déficit hídrico y la falta de luz durante el invierno.

Una vez concluido el análisis biológico, el capítulo desarrolla el estudio de la envolvente en climas fríos, mediante la definición de los desafíos a los que tienen que hacer frente según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. En las regiones de climas fríos, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a las condiciones de bajas temperaturas y falta de luz durante el invierno mediante estrategias de captación de la radiación solar, conservación del calor en el interior y ventilación para mantener la calidad del aire interior.

La generación de diseños conceptuales ejerce de conexión entre la información obtenida en la exploración biológica y el desarrollo de un caso de estudio de envolvente, es decir conecta los mecanismos y estrategias extraídos de las plantas y las funciones requeridas por la envolvente mediante posibles ideas de aplicación que tienen en cuenta los retos de diseño en los edificios y las posibles innovaciones respecto a las soluciones actuales de adaptabilidad. Por último, se presenta un caso de diseño de envolvente en climas fríos (Caso de diseño 1) con funcionamiento y diseño adaptativo para captar y conservar la energía térmica, permitiendo la ventilación mediante un sistema que minimize las pérdidas de calor.

CAPÍTULO 5: Climas templados

El capítulo 5 comienza con la definición del macrobioclima Templado y su correspondiente bioma el bosque caducifolio templado, ocupando Europa las zona central y oeste, representado en España por el norte de la Península Ibérica. Se definen las variables de temperatura, precipitación y humedad, y se estudian las adaptaciones de las plantas a este entorno. Diversos ejemplos de plantas son analizados por sus estrategias biológicas de adaptación a la marcada estacionalidad climática y las condiciones paisajísticas de bosques densos e impenetrables, como los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas templados. Una vez concluido el análisis biológico, el capítulo desarrolla el estudio de la envolvente en climas templados, mediante la definición de los desafíos a los que tienen que hacer frente según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

En las regiones de climas templados, la envolvente hará frente a las condiciones de temperaturas moderadamente frías en invierno y cálidas en verano, radiación solar variable (mayor en verano que en invierno) y elevada humedad atmosférica, a través de la adaptabilidad. Dicha adaptabilidad se alcanzará mediante estrategias de captación de la radiación solar y conservación del calor en el interior durante los meses fríos; protección de las ganancias solares y extracción del calor generado en el interior por enfriamiento durante los meses cálidos; y ventilación para mantener la calidad del aire interior. También se identifican las abundantes precipitaciones y la humedad atmosférica como potencial del entorno climático templado, pudiendo desarrollarse estrategias de recogida y almacenamiento de agua, que pueden contribuir a las demandas de agua en el interior del edificio. La generación de diseños conceptuales conecta la información obtenida en la exploración biológica y el desarrollo de un caso de estudio de envolvente a través de la matriz de diseño. Finalmente se presenta un caso de diseño de envolvente en climas templados (Caso de diseño 2) con funcionamiento y diseño adaptativo para regular los niveles de humedad ambiental.

CAPÍTULO 6: Climas cálidos

El capítulo 6 estudia las regiones europeas situadas en climas cálidos, esto es el macrobioclima Mediterráneo incluyendo las áreas mediterráneas desérticas, cuyos biomas son el bosque y la maquia mediterráneos y las formaciones vegetales desérticas, representado en Europa por sus límites más meridionales a lo largo de su franja costera del Mediterráneo como entornos de transición entre las regiones templadas y las tropicales a la vez que entre las húmedas y las áridas. Se definen las variables de temperatura, precipitación y humedad, y se estudian las adaptaciones de las plantas a este entorno. Diversos ejemplos de plantas son analizados por sus estrategias biológicas de adaptación a las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz como los factores limitantes para su desarrollo. Una vez concluido el análisis biológico, el capítulo desarrolla el estudio de la envolvente en climas cálidos, mediante la definición de los desafíos a los que tienen que hacer frente según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

En las regiones de climas cálidos, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a las condiciones de elevadas temperaturas, intensa radiación solar y escasa humedad relativa mediante estrategias de protección de las ganancias solares, extracción del calor generado en el interior por medio del enfriamiento y ventilación para mantener la calidad del aire interior.

La generación de diseños conceptuales conecta los mecanismos y estrategias extraídos de las plantas y las funciones requeridas por la envolvente mediante posibles ideas de aplicación que tienen en cuenta los retos de diseño en los edificios y las posibles innovaciones respecto a las soluciones actuales de adaptabilidad. Por último, se presenta un caso de diseño de envolvente en climas cálidos (Caso de diseño 3) con funcionamiento y diseño adaptativo para protegerse del exceso de luz y calor durante el día, y mantener la calidad del aire interior mediante mecanismos de ventilación nocturna.

CAPÍTULO 7: Conclusiones

En este último capítulo se presentan las conclusiones a las que se ha llegado con este trabajo, revisándose la hipótesis de partida y los objetivos marcados al comienzo. Se discute la contribución del trabajo al estado del arte, exponiendo los aspectos originales e innovadores de la tesis en relación con los trabajos realizados hasta ahora en el campo de aplicación de la biomimética al diseño de envolventes en edificios. También se ponen de manifiesto las limitaciones y desafíos encontrados en el desarrollo de la investigación, teniendo en cuenta los avances en la ciencia de los materiales activos, aspecto de suma relevancia para poder desarrollar con éxito las pruebas de prototipado y su aplicación al edificio.

Asimismo, se proponen líneas futuras de investigación sobre las posibilidades de desarrollo de geometrías por diseño paramétrico. Y la fabricación mediante múltiples materiales que puedan reaccionar al medio ambiente a través de la deformación dependiendo únicamente de estímulos ambientales, teniendo en cuenta que la elección de dichos materiales activos no comprometa los posibles beneficios ambientales obtenidos mediante la metodología biomimética.

1.6 Publicaciones

A lo largo de los estudios de doctorado, esta investigación ha sido presentada en diversos congresos internacionales y publicada en revistas de impacto. A continuación se detallan todas las divulgaciones:

Publicaciones:

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 67, January 2017, Pages 692-703, ISSN 1364-0321, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018.

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R. Adaptive architectural envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control. In: Proceedings of the 10th conference on advanced building skins, Bern, Switzerland; November 2015.

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R. Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles. J Facade Des Eng 2015;3(1):2015. http://dx.doi.org/10.3233/FDE-150026.

López M, Rubio R, Martín, "Architectural envelopes that interact with their environment," 2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), Gijon, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/SmartMILE.2013.6708189

Congresos:

2015. "Edificios vivos que respiran. Hacia una arquitectura el futuro" en el III TedxYouth, Gijón.

2015. "Adaptive Architectural Envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control" en el X Congreso Advanced Building Skins, Berna.

2015. "Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles" en el VII Congreso Internacional ICAE, San Sebastián.

2013. "Architectural envelopes that interact with their environment" en el Congreso Internacional SmartMile, Gijón.

Premios:

Premio al mejor póster de presentación de tesis doctoral, durante las II Jornadas del G9, en la Universidad de Extremadura, Noviembre 2013.

Referencias

Armstrong R., (2012) *Living architecture: how synthetic biology can remake our cities and reshape our lives.* TED Books.

Berkoz E, Yilmaz Z., (1987) *Determination of the overall heat transfer coefficient of the building envelope from the bioclimatic comfort point of view.* Archit Sci Rev;30(4):117–21.

Chávez del Valle FJ., (2002) *Zona variable de confort térmico.* Universitat Politécnica de Catalunya.

Del Grosso AE, Basso P., (2010) *Adaptive building skin structures*. IOP Sci Mater Struct.

European Commission. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. Energy Roadmap 2050, Com 2011;2011:885/2. disponible en http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/ com_2011_8852_en.pdf (consultado en 2016)

European Commission. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. Horizon 2020 - The Framework Pro- gramme for Research (and Innovation); 2011, disponible en http://eur-lex.europa.eu/legal- content/EN/TXT/PDF/?uri 1-4 CELEX:52011DC0808&from 1-4 EN (consultado en 2016)

IEA, (2008) International Energy Agency, *World Energy Outlook*, OECD/IEA, Paris.

Kamal-Chaoui L, Robert A., (2009) *Competitive cities and climate change*, OECD regional development working papers no, 2. OECD Publishing.

Skou A., (2013) *Future buildings: tough and smart on energy efficiency*. Research*eu results magazine, Issue 23. CORDIS Unit, Publications Office of the European Union, disponible en http://bookshop.europa.eu/en/research-eu-results-maga zine-pbZZAC13005/ (consultado en 2016)

Stevanovic S., (2013) *Optimization of passive solar design strategies: a review*. Renew Sustain Energy Rev;25:177–96. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.028.

OECD, (2006) *Competitive Cities in the Global Economy*, OECD, Paris.

OECD, (2009a) *The Economics of Climate Change Mitigation: Policies and Options for Global Action beyond 2012*, OECD, Paris.

OECD, (2009b) *Cities, Climate Change and Multilevel Governance*, Environment Working Papers, OECD, Paris.

Oral GK, Yilmaz Z., (2003) *Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view*. Energy Build;35:383–8.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., (2008). *A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings*, 40(3):394–398.

Ürge-Vorsatz D, Eyre N, Graham P, Harvey D, Hertwich E, Jiang Y, et al. (2012) Chapter 10 – energy end-use: building.*Global energy assessment – toward a sustainable future.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge Uni- versity Press; Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis; p. 649–760.

Wang J, Beltrán LO, Kim J., (2012) *From static to kinetic: a review of acclimated kinetic building envelopes.* Denver, CO; p. 4022–9.

WBCS, Worldwide Bioclimatic Classification System 1996-2017, disponible en http://www.globalbioclimatics.org/default.htm (consultado en 2017)

Zhai Z, Previtali JM., (2010) *Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation.* Energy Build;42 (3):357–65. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.002.

Myrtus communis

CAPÍTULO 2

Estado del arte

"El control del entorno y la creación de condiciones adecuadas a sus necesidades y al desarrollo de sus actividades son cuestiones que el hombre se ha planteado desde sus orígenes. A lo largo del tiempo, los hombres han buscado, en la construcción de sus refugios, satisfacer las necesidades humanas básicas: la protección ante los elementos y la provisión de un espacio dotado de una atmósfera favorable para el recogimiento espiritual."

Olgyay & Aladar, "Design with climate", 1963

CHAPTER 2

State of the art

Abstract

Environmental comfort is the range of environmental conditions considered acceptable within a living space, in which the human being develops his activities (Bustamante, 2009). The absence of comfort implies a feeling of discomfort, whether due to cold, heat, noise or lighting, either in excess or in deficiency among others. The "*Building Technical Code*" (*Código Técnico de la Edificación - CTE*) collects diverse documents that state factors like thermal well-being, quality of the interior air, quality of the acoustic environment or visual well-being to achieve interior comfort. A building must generate spaces that offer the user the appropriate environmental conditions for the development of their activities in comfort. Both the building envelope and the interior building systems must meet these conditions. To do this, it must take into consideration the environment and its climatic conditions, the behaviour of its inhabitants and the use of the building (Bustamante, 2009). The effect of the surrounding on the building is represented by different environmental aspects, to which it responds according to its architecture, the materials used in its construction and the use given by its occupants. The response of the building to these demands is variable in time, according to the seasons of the year or the time of day, the use or the constructive system. There is then a permanent interaction between the changing environment, the building and its occupants, and therefore the building must have systems that allow it to adapt to achieve internal comfort. The building envelope, without distinction between walls and roof, is the interface between external environmental factors and the inner demands of the occupants (Del Grosso & Basso, 2010). The building envelope separates the interior and exterior environments of a building and is the key factor that determines the quality, and controls the internal conditions regardless of the changing exterior (Sadineni *et al*., 2011). The envelope is one of the most important design parameters, since it determines the internal comfort and this affects the energetic use of the building (Oral & Yilmaz, 2003) (Berkoz & Yilmaz, 1987). Therefore, building envelopes, architectural skins or façades play such an important role in the regulation and control of energy expenditure, since they act as intermediary filters between the external environmental conditions and the desired requirements in the interior.

Throughout this second chapter, the concepts of adaptation will be introduced, both in the built environment and in Nature, with the aim of achieving adaptability in buildings through living architectural envelopes. In point 2.4 the concept of Nature as inspiration in architecture is introduced and the potential of developing envelope systems for buildings (more similar to the natural envelopes capable of interacting and responding to the changing medium through adaptive surfaces) is discussed. The application of ideas taken from Nature to architecture is done through the science of biomimicry. This is a concept that is developed in point 2.5 and for the understanding of which several case studies are analysed throughout section 2.6. After a comparison with other studies, the contribution of this thesis is highlighted.

2.1 Introducción

El confort ambiental es el rango de las condiciones del entorno consideradas aceptables dentro de un espacio habitable, en el que el ser humano desarrolla sus actividades (Bustamante, 2009). La ausencia de confort implica una sensación de incomodidad o molestia, ya sea por frío, calor, deslumbramiento, exceso de ruido o falta de iluminación, entre otros. El Código Técnico de la Edificación (CTE, 2016) recoge distintos documentos para alcanzar el confort interior mediante factores como el bienestar térmico, la calidad del aire interior, la calidad del ambiente acústico o el bienestar visual. Un edificio debe generar espacios que ofrezcan al usuario las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de sus actividades en situación de confort. Tanto la envolvente del edificio como los sistemas constructivos del interior deben alcanzar estas condiciones. Para ello se debe tener en consideración el medio y sus condiciones climáticas, el comportamiento de los usuarios y el uso del edificio (Bustamante, 2009).

El efecto del medio sobre el edificio está representado por diferentes aspectos ambientales, frente a los cuales éste responde según su arquitectura, los materiales utilizados en su construcción y el uso que le dan sus ocupantes. La respuesta del edificio frente a estas demandas es variable en el tiempo (según las estaciones del año o el momento del día), el uso o el sistema constructivo. Existe entonces una permanente interacción entre el exterior cambiante, el edificio y sus ocupantes, y por ello el edificio debe disponer de sistemas que le permitan adaptarse para alcanzar el confort interno. La envolvente del edificio, sin distinción entre muros y techo, es la interfaz entre los factores ambientales exteriores y las demandas interiores de los ocupantes (Del Grosso & Basso, 2010). La envolvente del es el factor clave que determina la calidad y controla las condiciones internas, independientemente del exterior cambiante (Sadineni *et al.*, 2011). Es también uno de los parámetros de diseño más importantes, pues determina el confort interno y esto afecta al uso energético del edificio (Oral & Yilmaz, 2003) (Berkoz & Yilmaz, 1987). Por lo tanto, las envolventes de los edificios, las pieles arquitectónicas o las fachadas, tienen un papel importante en la regulación y control del gasto energético, ya que actúan como filtros intermediarios entre las condiciones ambientales externas y los requisitos deseados en el interior.

A lo largo de este segundo capítulo se introducirán los conceptos de adaptación, tanto en el entorno construido como en la naturaleza, con el objetivo de alcanzar la adaptabilidad en los edificios a través de envolventes arquitectónicas vivas. En el punto 2.4 se introduce el concepto de naturaleza como inspiración en la arquitectura y se discute sobre el potencial de desarrollar sistemas envolventes para edificios más parecidos a las envolventes de la naturaleza capaces de interactuar y responder al medio cambiante a través de superficies adaptativas. La aplicación de ideas tomadas de la Naturaleza a la arquitectura se realiza mediante la ciencia de la biomímesis, concepto que se desarrolla en el punto 2.5 y para cuyo entendimiento se analizan varios casos de estudio tanto construidos como proyectos teóricos a lo largo del punto 2.6, donde tras una comparativa con otros estudios se resalta la contribución aportada por esta tesis. Finalmente en el punto 2.8 se redactan las conclusiones del capítulo.

2.2 Problemática de partida

La mayoría de las definiciones de envolvente de un edificio establecen significados de cerramiento o una separación entre el interior y el exterior, que proporciona las siguientes funciones: soporte, control, acabado (estético) y distribución de servicios. Sin embargo, resulta más interesante pensar en la envolvente del edificio, sin distinción entre muros y techo, como una interfaz y no como una separación, entre los factores ambientales externos y las demandas interiores de los ocupantes (Del Grosso & Basso, 2010), es decir, la envolvente del edificio como un moderador ambiental (Wang *et al.*, 2012).

En oposición a esta idea de envolvente como interfaz reguladora nos encontramos con que generalmente los cerramientos de edificios son construidos con grandes restricciones que excluyen la interacción con el entorno, la eficiencia energética o la optimización de materiales. A pesar de que las características climáticas de cada zona son parámetros variables, las fachadas convencionales son en gran parte estáticas, y suplen esta falta de interacción mediante sistemas dinámicos que utilizan grandes cantidades de energía para controlar el confort interno, pues ya sólo el consumo de energía destinada a las instalaciones de calefacción y refrigeración de espacios interiores representa el 60% de la energía total consumida en los edificios (Omrany *et al.*, 2016). Además de la problemática de los diseños estáticos, otros parámetros afectan al rendimiento y la eficiencia energética de los edificios, como por ejemplo los criterios arquitectónicos o los criterios constructivos. A continuación se detalla cada uno de ellos:

- **Criterios arquitectónicos:** se refieren a la tendencia de dividir las funciones implícitas en los elementos arquitectónicos según formas, estructuras y materiales a lo largo de la historia de la arquitectura (Oxman, 2012). Además, la herencia del Estilo Internacional ha repartido, por ciudades de todo el Mundo, grandes prismas acristalados que no corresponden a los valores estéticos locales ni a las condiciones climáticas del lugar (Chávez del Valle, 2002).

- **Criterios constructivos:** este tipo de criterios apunta a los procesos a fabricación industrial en serie, en lugar de producciones personalizadas para cada caso particular, para la producción de componentes de construcción como la causa de que los edificios sean funcionalmente inertes, irresponsables y perjudiciales para el medio ambiente cambiante (Soar & Andreen, 2011) (Oxman, 2010).

Por ejemplo, el sistema de muro cortina (Figura 2.1) a través de elementos prefabricados, refleja la demanda de fachadas producidas industrialmente desde la segunda mitad del siglo XX hasta nuestros días. La innovación en las funciones tecnológicas de la arquitectura es clave para hacer frente a estos desafíos. Cabe señalar que la aparición de nuevas técnicas de fabricación y construcción permiten romper las restricciones geométricas de los procesos tradicionales. Por ejemplo, la fabricación aditiva representa un nuevo campo de investigación y desarrollo en la creación de productos personalizados y adaptados a cada usuario. En el campo de la arquitectura y la construcción, la combinación de fabricación aditiva y diseño generativo ha abierto recientemente las puertas de la creación personalizada de construcciones in situ (Spiller & Armstrong, 2011).

Figura 2.1
Federal Kluczynski en Chicago, de Mies van der Rohe. Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

La suma de todos los condicionantes descritos hacen de la envolvente un sistema estático e inerte, responsable directa en el rendimiento y la eficiencia energética de los edificios, sobrepasando el consumo energético por parte de los sectores de la industria y transporte (Pérez-Lombard *et al.*, 2008). En consecuencia, el sector de la construcción contribuye en casi un tercio del total de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012), además de otros datos como la utilización del 23% de la energía primaria global y el 30% de la electricidad global (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2015).

Teniendo en cuenta que, según informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos publicado en el año 2009 (Kamal-Chaoui & Robert, 2009), aproximadamente la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas. Esta proporción está aumentando con el tiempo, estimándose en alcanzar el 60% en 2030, las ciudades son las responsables del consumo del 60 - 80% de la producción mundial de energía y representan una proporción aproximadamente igual de las emisiones mundiales de dióxido de carbono. Estos datos han llevado a las autoridades urbanas a desarrollar soluciones políticas innovadoras de planificación y gestión urbana para reducir la demanda mundial de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (Kamal-Chaoui & Robert, 2009).

De no tomarse medidas correctoras sobre la movilidad y la expansión de las ciudades o los mecanismos para alcanzar el confort ambiental en los edificios, las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) indican que es probable que las ciudades aumenten el consumo mundial total de energía, alcanzando el 73% para el año 2030 (IEA, 2008).

En dichos informes también se mencionan los efectos que se conseguirían con la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, como los beneficios para la salud pública al reducir muchos de los contaminantes peligrosos del aire, tanto como que las reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero pueden beneficiar a la salud hasta compensar en gran parte los costos locales de reducción de dichas emisiones (Kamal-Chaoui & Robert, 2009). También se considera como posibles beneficios evitar el déficit de electricidad y los apagones, al reducir la demanda energética para reducir el efecto de las islas de calor urbano y la refrigeración de los edificios durante los períodos de calor extremo (Hallegatte *et al.*, 2008).

Por todo ello los gobiernos nacionales, regionales y locales pueden implementar una serie de políticas de construcción para ayudar a las autoridades locales a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse al cambio climático. Dichas políticas tienen como objetivo *"aumentar la eficiencia energética de los edificios mediante el diseño y la adaptación a través de dispositivos de ahorro de energía";* y "*aumentar la participación local en la captura y generación de energías renovables*" (Kamal-Chaoui & Robert, 2009).

Esto se refleja en la forma en que la Unión Europea ha estado desarrollando un gran número de programas de fomento de la eficiencia para la investigación y la innovación, como el marco Horizonte 2020 (European Commission, 2011), donde se propone que la eficiencia energética sea elevada a un nivel superior a través de «*la aplicación coherente de estrategias de diseño pasivas y activas para reducir las cargas de calefacción y refrigeración*», «*aumentar la eficiencia energética de los equipos*» y «*el uso de energías renovables*" (Stevanovic, 2013). Dichos programas se centran en la rehabilitación de edificios, o en la instalación de tecnologías de eficiencia energética, especialmente en fachadas. Los mejores materiales de aislamiento, fuentes de energía más ecológicas, un financiamiento más eficiente y un mejor uso de la tecnología de la información y la comunicación son algunos de los principales caminos que se están explorando (Skou, 2013).

Dada la importancia de la envolvente en la regulación y control del gasto energético, se considera esta como uno de los parámetros de diseño más importantes, pues determina el confort interno y esto afecta al uso energético del edificio (Oral & Yilmaz, 2003)(Berkoz & Yilmaz, 1987). Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de un nuevo tipo de envolvente arquitectónica adaptativa, que ayude a mejorar el rendimiento energético en el edificio y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental, actuando desde el diseño y la integración de un comportamiento interactivo de la envolvente con el medio, sin depender de servicios de instalaciones independientes y aislados como se viene haciendo hasta ahora.

2.3 Adaptación

2.3.1 Adaptación en la envolvente

Como se ha explicado en el punto anterior, uno de los mayores retos a los que tiene que hacer frente la envolvente del edificio es la regulación de los parámetros ambientales, tanto internos como externos, cambiantes en todo momento, dependiendo del uso y ocupación del edificio, los factores climáticos o la época del año o la hora del día. La radiación solar, la temperatura, la humedad, el viento, el ruido y el dióxido de carbono son los parámetros ambientales básicos que afectan al edificio, influyendo significativamente sobre las demandas de confort de los ocupantes, así como el rendimiento del edificio (Omrany *et al.*, 2016). A pesar de que las características climáticas de cada zona son parámetros variables, las fachadas convencionales son en su mayoría estáticas, y en consecuencia se requiere de grandes cantidades de energía para controlar el confort interno, pues ya sólo el consumo de energía destinada a las instalaciones de calefacción y refrigeración de espacios interiores representa el 60% de la energía total consumida en los edificios (Omrany *et al.*, 2016).

Tradicionalmente, la envolvente del edificio ha sido considerada como una barrera térmica o de protección, sin embargo este enfoque limita las soluciones más eficientes, donde la envolvente del edificio no se considera como una barrera sino como un medio. Dichas soluciones convencionales para fachadas y cubiertas no están diseñadas para una óptima adaptación a los problemas y necesidades contextuales, por tanto a diferencia de los sistemas estáticos y convencionales para fachadas, un nuevo tipo de envolvente arquitectónica adaptativa es necesaria para mejorar el rendimiento energético en los edificios.

Son varias las definiciones referidas a las envolventes arquitectónicas con capacidad de adaptación, que están actualmente disponibles en la literatura, como por ejemplo *"Climate Adaptive Building Shell"* (de ahora en adelante CABS) de Loonen (2010) (De Boer *et al.*, 2011); *"Acclimated Kinetic Envelope"* (AKE) por Wang *et al.* (2012); *"Adaptive skin"* por Hasselaar (2006); *"Intelligent skin"* por Wigginton y Harris (2002) o *"Adaptive building skins"* por Del Grosso y Basso (2013). Algunos de estos conceptos son compilados y comparados en el trabajo de revisión de Fiorito *et al.* (2015).

Mayoritariamente, las soluciones actuales para alcanzar la adaptabilidad en estos sistemas de envolvente pasan por la integración de elementos mecánicos y el uso de materiales de construcción que responden a los cambios producidos en el entorno. A continuación se detalla cada una de las soluciones:

- **Elementos mecánicos:** tradicionalmente se han buscado sistemas de control externos en ventanas y puertas, mediante la utilización de dispositivos manuales de protección y de sombreado, económicos y fáciles de manejar, tales como lamas, persianas o parasoles. Estos mecanismos pueden controlar, por ejemplo, la entrada térmica solar y reducir así las ganancias térmicas a través de ventanas u otras áreas de vidrio (Leatherbarrow & Mostafavi, 2002). Zhiqiang Zhai en su investigación sobre el rendimiento energético de las antiguas casas vernáculas demostró que "merece la pena considerar las tradiciones observadas en la arquitectura vernácula como una aproximación para mejorar el rendimiento energético del edificio y es por tanto una dirección científica que puede ayudar a mejorar su rendimiento" (Zhai & Previtali, 2010). Hoy en día este tipo de sistemas de control puede colocarse de forma externa, como por ejemplo dispositivos de climatización fijados en el exterior, o integrado en el diseño como parte de la misma. Diversos estudios afirman que la integración de estas tecnologías en el proceso de diseño influyen en la mejora de soluciones de fachada más innovadoras y sostenibles (Watson, 1997).

- **Materiales:** en los últimos años ha surgido una amplia gama de materiales inteligentes con aplicaciones al sector de la construcción, tratando de mejorar la adaptabilidad de la envolvente (Addington & Schodek, 2004). Algunos de estos materiales son los llamados de cambio de fase, utilizados como una masa térmica o tecnologías de almacenamiento de calor latente, que colocados en fachadas actúan como sistemas pasivos de ahorro de energía (Sadineni *et al.*, 2011) (Mavrigiannaki & Ampatzi, 2016) (Cabeza *et al.*, 2011).

Dentro del alcance de esta investigación se adopta el término envolvente arquitectónica viva, definiéndose como aquella que responde y gestiona de forma pasiva las condiciones ambientales cambiantes tanto interiores como exteriores. Envolvente arquitectónica viva es una designación para un concepto que ya se ha descrito en diversos términos como se ha detallado previamente. Este tipo de envolventes tienen la capacidad de cambiar con el tiempo a través de estrategias de adaptación para anticiparse a las variaciones ambientales exteriores, así como a las actividades interiores y sus interacciones con los usuarios.

En el siguiente apartado se detallan los conceptos, ideas o sistemas para envolventes arquitectónicas, que se han considerado más relevantes como ejemplos de avances que buscan lograr la adaptación para hacer frente a los diversos aspectos ambientales de una manera autónoma, dinámica e inteligente.

2.3.2 Avances hacia la envolvente arquitectónica adaptativa

En las últimas décadas han ido surgiendo paulatinamente diferentes propuestas de diseño para fachadas más activas y menos estáticas, capaces de responder a los diferentes aspectos ambientales cambiantes. Algunas de estas propuestas no han pasado del nivel teórico debido a la falta de tecnología en ese momento para una idea tan futurista, como por ejemplo el concepto desarrollado en 1930 por Le Corbusier de una casa universal para todos los climas, *"sólo una casa para todos los países, la casa de la respiración exacta"* que mediante *"muros neutralizantes"* permitiría mantener el interior del edificio a una temperatura constante de 18°C (Le Corbusier, 1991).

Posteriormente, en 1970, William Zuk describió la arquitectura cinética como un campo de arquitectura en el que elementos del edificio o el edificio entero tiene la capacidad de adaptarse al cambio a través de la cinética de un modo reversible, deformable, progresivo y móvil (Zuk & Clark, 1970).

Ya en 1981, Mike Davies en su artículo titulado *"Un muro para todas las estaciones"* desarrolló el concepto de un *"muro polivalente"* (Davies, 1981). La idea se basa en la creación de una fachada, que además de proporcionar las clásicas funciones de cierre y aislamiento, es capaz de regular los requerimientos de control ambiental, ventilación o iluminación en cada momento, de forma automática, mediante un sistema de finas capas con capacidad de absorber, reflejar, filtrar o transferir la energía del medio (Figura 2.2). El término "fachada inteligente" deriva de este concepto, aunque a día de hoy su idea sigue sin ejecutarse y las investigaciones en la materia demuestran que todavía queda un largo camino por recorrer para alcanzar esta idea de pared polivalente ideal (Knaack *et al.*, 2007).

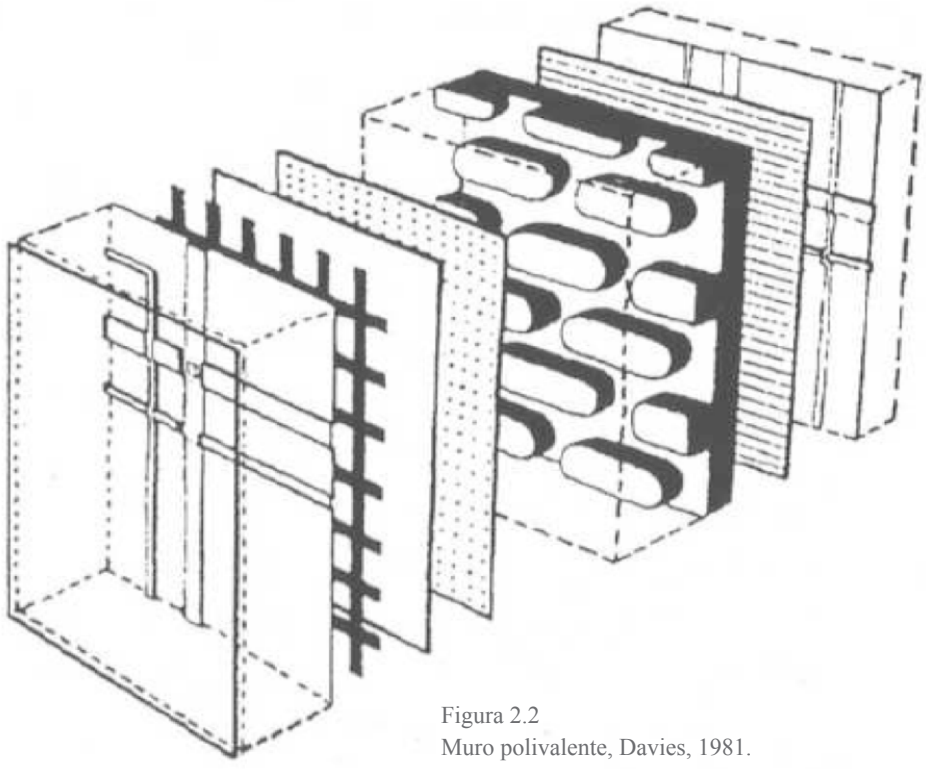


Figura 2.2
Muro polivalente, Davies, 1981.
Fuente: Mike Davies
Disponible en: www.facadesconfidential.blogspot.com

El Instituto Árabe de París (Figura 2.3) completado en 1987, obra del arquitecto Jean Nouvel, fue uno de los primeros edificios en emplear una fachada activa y dinámica basada en la respuesta automática a la luz solar mediante el uso innovador de dispositivos mecánicos fotosensibles, como estrategia para lograr una mayor eficiencia energética. Los mecanismos de obturación controlados de forma automática son una interpretación técnica de las tradicionales pantallas de protección solar árabes (Loonen, 2010). 25.000 células solares, similares a una lente de la cámara, se controlan a través de un ordenador para regular los niveles de luz en la fachada sur (Fortmeyer & Linn, 2014) (Arab World Institute, 2016). Loonen, en el estado del arte de las CABS (Loonen *et al.,* 2013), incluye esta envolvente dentro de la categoría adaptación térmica- óptica, lo que significa que la adaptación provoca cambios para mantener el equilibrio de la energía térmica del edificio y, al mismo tiempo, el comportamiento adaptativo influye en la percepción visual de los ocupantes. Aunque las pruebas (de laboratorio y de campo a escala real) para demostrar que el confort visual y los beneficios energéticos pueden estar asociados con estos sistemas de sombreado cinético, se considera que su diseño funcional no se puede validar como un caso exitoso de envolvente adaptativa y debería ser más considerado como un complejo sistema de fachada (Lee & Selkowitz, 1998) (Rheault & Bilgen, 1990). Según los estudios de Coelho y Maes sobre las persianas (Coelho & Maes, 2009), los paneles empleados en la fachada del Instituto Árabe son ruidosos, tienden a romperse fácilmente y son totalmente automatizados, no permitiendo a los residentes en el edificio tener el control sobre su propio espacio. Se trataría de una adaptación alcanzada por medio de dispositivos mecánicos en ventanas que consumen energía eléctrica.

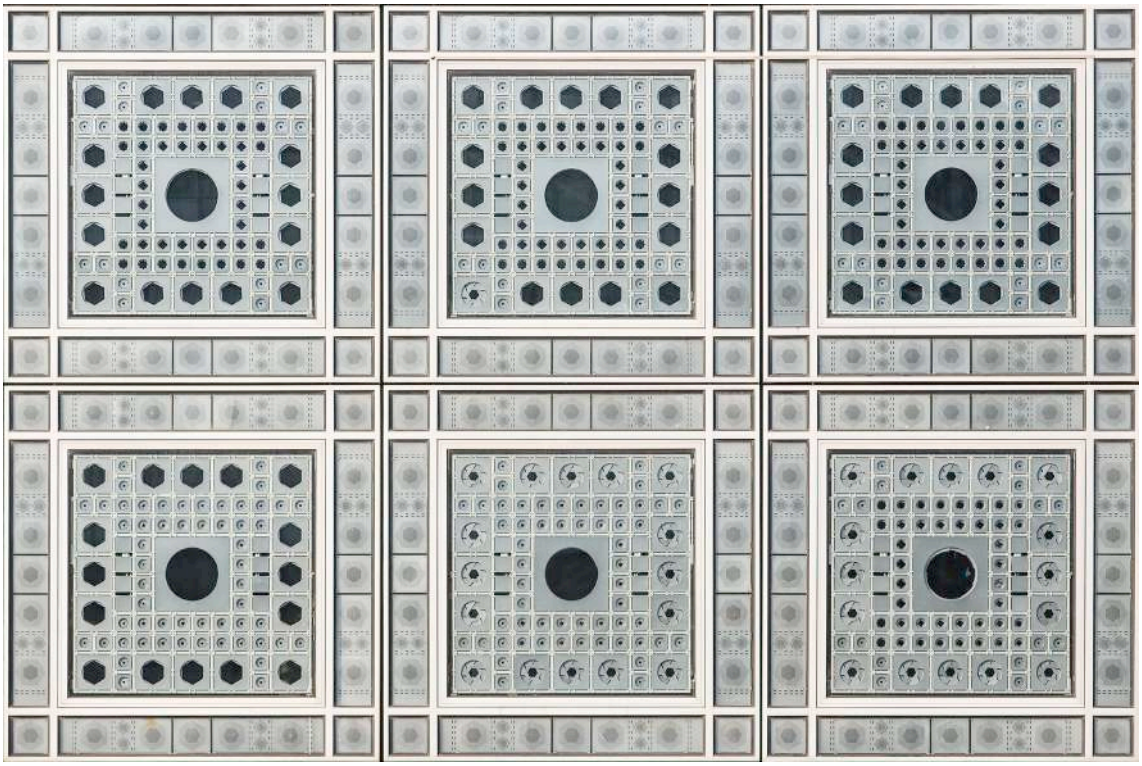


Figura 2.3
Detalle de los paneles dinámicos del Instituto Árabe de París.
Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

En los últimos años se han logrado avances en las envolventes arquitectónicas adaptativas, a través de sistemas cinéticos y estructuras dinámicas. A continuación se exponen los casos del edificio de oficinas Media-ICT obra de Enric Ruiz Geli (Cloud 9, 2016) y la instalación Bloom obra de Doris Kim Sung, debido a su carácter experimental e innovador.

En el primero, el edificio de oficinas Media-ICT (Figura 2.4) en Barcelona, el equipo de Enric Ruiz Geli diseñó una arquitectura performativa con eficiencia energética a través de una "*piel como expresión de energía*" (Media-ICT, 2016). El edificio interactúa con su entorno a través de la piel ETFE, que sumado a una cubierta con sistemas fotovoltaicos y de reciclaje de agua de lluvia reducen las emisiones de carbono en un 95% (Dent & Sherr, 2014). La tecnología ETFE aplicada a sistemas de fachadas ha sido utilizada en diversos edificios por todo el mundo, como por ejemplo el Proyecto Eden en Londres (Figura 2.5) (The Eden Project, 2016), donde el revestimiento transparente de ETFE proporciona al entorno condiciones de humedad óptimas para crear los distintos microclimas de los biomas que forman el jardín botánico. Las envolventes del estadio Arena en Munich (Figura 2.6) (Allianz Arena, 2016) y el centro nacional acuático en Pekín (Figura 2.7) (National Aquatics Center, 2016), también son ejemplos de uso de tecnología ETFE, aunque en estos casos con funcionalidad estética buscando resultados de arquitecturas icónicas. A diferencia de estos ejemplos, en el edificio de oficinas Media-ICT se crea esta envolvente adaptativa para lograr una reducción del 65% en las emisiones de dióxido de carbono, debido al filtro solar dinámico de ETFE y a la eficiencia energética relacionada con la instalación sensores inteligentes. La envolvente se diferencia según la orientación sea sureste o suroeste. En la cara orientada al sureste se disponen tres capas inflables de ETFE formando una nube vertical que filtra la radiación solar, cuyo sistema de inflado se activa automáticamente mediante una red de sensores de temperatura. En la cara orientada al suroeste, donde la radiación solar es más intensa, la protección solar se logra a través una nube por medio de un sistema de niebla con gas nitrógeno, que proporciona un sombreado variable reduciendo la ganancia de calor solar hasta un 90% (Media-ICT, 2016) (Geli, 2011) (Geli & Rifkin, 2010).

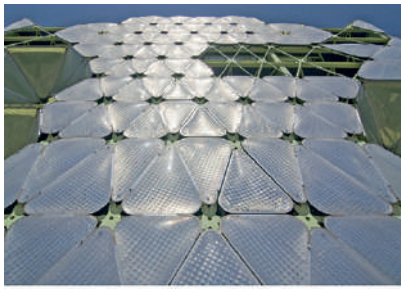


Figura 2.4
Edificio Media-ICT.
Fuente: Ruiz-Geli
Disponible en:
http://www.ruiz-geli.com

Figura 2.5
Proyecto Eden, Londres.
Fuente: Shutterstock. Disponible en:
www.shutterstock.com/es/

Figura 2.7
Centro nacional acuático, Pekín.
Fuente: Shutterstock. Disponible en:
www.shutterstock.com/es/

Figura 2.6
Estadio Arena, Munich.
Fuente: Shutterstock. Disponible en:
www.shutterstock.com/es/

Figura 2.8
Instalación Bloom como sistema reactivo a la temperatura.
Fuente: DO-SU
Disponible en: www.dosu-arch.com

En el segundo, el estudio de Doris Kim Sung proyectó Bloom (Figura 2.8) en Los Ángeles, California, como una instalación ambientalmente responsable, combinando la experimentación de materiales, la innovación estructural y el diseño paramétrico. Bloom es una envolvente que responde a los cambios de temperatura y luz, y funciona como un instrumento de seguimiento solar que regula y reduce el calor almacenado bajo su superficie sin necesidad de refrigeración artificial. Los paneles termo-bimetálicos, con diferentes coeficientes de expansión, se utilizan para regular la temperatura de forma pasiva. La estructura metálica responde a los cambios ambientales, curvándose y abriéndose para la ventilación y por lo tanto evitando las altas temperaturas en el espacio interior (Kim, 2012) (Bloom, 2016) (Dent & Sherr, 2014) (Cantrell & Holzman, 2015). Bloom muestra el potencial de los materiales inteligentes (López *et al.*, 2015) que utilizan las condiciones ambientales, en este caso la temperatura como activador, sin utilizar estímulos eléctricos y el resultado es un sistema de respuesta sostenible capaz de ahorrar energía y prescindir de sistemas de refrigeración.

A lo largo de este punto se han expuesto diversos intentos de búsqueda de sistemas que permitan alcanzar una adaptación en los sistemas de envolventes del edificio. A continuación se estudiará cómo los organismos alcanzan la adaptación en la Naturaleza, para pasar a valorar si tales estrategias y mecanismos de adaptación son aplicables a la generación de diseños para envolventes arquitectónicas.

2.3.3 Adaptación en la Naturaleza

"La adaptación es el proceso evolutivo mediante el cual un organismo aumenta su capacidad para vivir en su hábitat" (Dobzhansky *et al.*, 1968).

Los organismos vivos, a lo largo de la evolución han desarrollado diferentes estrategias de adaptación para hacer frente a los diversos aspectos ambientales. Dicha evolución y adaptación de los organismos vivos a su entorno se produce de tres maneras: morfológica, fisiológica y etológica (Azcón-Bieto & Talón, 2000). La adaptación morfológica o estructural es la relativa a la anatomía del organismo incluyendo la forma, el tamaño, el patrón o la estructura, permitiéndole una mejor funcionalidad para la supervivencia en ese entorno. Un ejemplo de adaptación morfológica es la diversidad de picos en las aves, como el colibrí, como resultado de un proceso lento y complejo, en el que retienen las características que les son mas favorables para la obtención de alimento y por tanto la supervivencia.

La adaptación fisiológica o funcional representa cambios en el funcionamiento del organismo, generalmente relacionada con procesos químicos como respuesta sistémica del individuo frente a un estímulo externo específico para sobrevivir. Como ejemplo se pueden citar las glándulas olfativas que han desarrollado ciertos mamíferos como las mofetas y comadrejas como estrategias de defensa para irritar los sentidos de los posibles depredadores. La adaptación etológica o de comportamiento es la que provoca modificaciones en las respuestas de los organismos ante determinados estímulos con la finalidad de subsistir, desarrollarse o reproducirse. Un ejemplo de este tipo de adaptación son los viajes migratorios que efectúan ciertas aves o la hibernación en ciertos organismos como los osos, para hacer frente a los cambios en las condiciones lumínicas o de temperatura del entorno.

Las soluciones biológicas de adaptación encontradas en la Naturaleza son de sumo interés debido a su complejidad, multifuncionalidad y capacidad receptiva. A diferencia de nuestros edificios, que permanecen inertes, los objetos vivos responden al ambiente y son capaces de adaptarse a las cambiantes condiciones del clima (Armstrong, 2012). Las envolventes en la naturaleza son superficies multifuncionales que surgen de una compleja interacción entre la morfología superficial y las propiedades físicas y químicas del organismo biológico como respuesta de adaptación al medio. Basándose en la definición de adaptación citada previamente, se estudian las posibilidades de desarrollo de un nuevo tipo de envolvente no mediante las superficies inertes tradicionales, sino con un revestimiento vivo, que podría albergar una amplia gama de tecnologías basadas en el comportamiento de las envolventes que se encuentran en la naturaleza (Beesley, 2006). En los próximos puntos se introduce el concepto de naturaleza como inspiración en la arquitectura y se discute sobre el potencial de desarrollar sistemas envolventes para edificios más parecidos a las envolventes encontradas en la naturaleza, con capacidad de interactuar con el medio a través de superficies adaptativas, es decir sistemas definidos como envolventes arquitectónicas vivas.

2.4 Naturaleza y Arquitectura

La Naturaleza siempre ha estado presente en la arquitectura, siendo una fuente de inspiración en el proceso proyectual a través de las formas o estructuras de organismos naturales. La historia de la arquitectura ha estado ligada a la arquitectura biomórfica, y es que ya en su origen más primitivo la arquitectura precisamente era biomórfica, tomando parecidos de las formas vegetales o animales, como por ejemplo nidos de ramas y hojas, alrededor de la forma de los cuerpos a proteger; o cabañas o estructuras de huesos de mamut (Estévez, 2005).

Haciendo un breve repaso por la historia reciente, encontramos que existen ejemplos de diseños en edificios inspirados en la naturaleza como el Palacio de Cristal (Figura 2.9) obra de Joseph Paxton, construido en 1851, con motivo de la Exposición Universal de Londres de ese mismo año (Benévolo, 1979), y supuso una gran innovación en la forma de construir invernaderos. A través de los avances tecnológicos en los sectores del acero y el vidrio se materializó el gran pabellón, cuyo diseño fue inspirado por los patrones estructurales de la hoja del lirio gigante (Figura 2.10) (*Victoria amazonica*) buscando la optimización material.

Figura 2.9
Palacio de Cristal obra de Joseph Paxton, 1851.
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

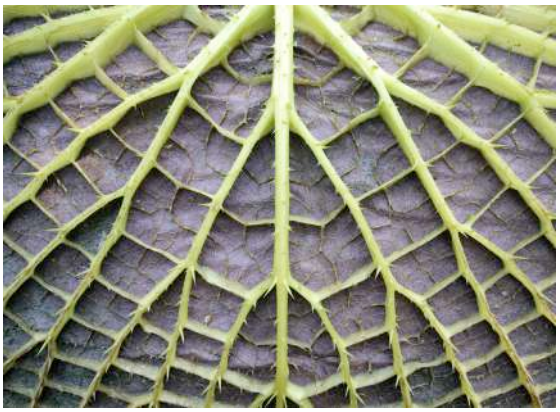


Figura 2.10
Patrón estructural de la hoja de Victoria amazonica.
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

A lo largo del siglo XX se encuentran inspiraciones desde la naturaleza a la arquitectura a través del Modernismo, como es el caso de la obra de Antoni Gaudí, que rompiendo con la tradición clásico-historicista fue pionero de una nueva tradición desde la vanguardia de la arquitectura biomórfica. En los proyectos de Gaudí se repiten constantemente elementos que copian las formas de los seres vivos, por ejemplo el desarrollo de la espiral (Figura 2.11) como forma de crecimiento natural o las geometrías regladas alabeadas en las estructuras para optimizar la eficacia material (Estévez, 2009).

Más recientemente, arquitectos como Frank Gehry y Santiago Calatrava proyectan una arquitectura biomórfica desde una directa traslación de las formas vegetales y animales a sus obras, incorporando elementos dinámicos al conjunto, dado su interés en el funcionamiento estructural de los esqueletos y sus movimientos.

También son conocidos otros acercamientos a la naturaleza a través del diseño estructural como por ejemplo el ingeniero Buckminster Fuller o el arquitecto Frei Otto. El primero materializó la aproximación del diseño estructural a la naturaleza mediante sus famosas cúpulas geodésicas, como la creada para albergar el antiguo pabellón norteamericano para la exposición de Montreal de 1967 (Figura 2.12), creadas a partir de complejas redes de unidades peatonales, hexagonales o triangulares buscando la eficiencia formal y material de acuerdo a estructuras observadas del mundo natural (Forbes, 2005). En Alemania, Frei Otto experimentó con el diseño de nuevas estructuras arquitectónicas a través de formas orgánicas en sistemas tensados buscando la eficiencia estructural (Gruber, 2010), como en el estadio olímpico de Munich (Figura 2.13).

Figura 2.11
Interior casa Batlló, obra de Antoni Gaudí. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Figura 2.12
Estructura de la cúpula geodésica para la exposición de Montreal 1967, obra de Buckminster Fuller. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Figura 2.13
Estructura tensada del estadio olímpico de Munich, obra de Frei Otto, 1972. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

2.5 Biomímesis

Los términos biomímesis o biomimética provienen de las palabras griegas bios, que significa vida, y mimesis, que significa imitar. La biomimética se define como la "*abstracción del buen diseño de la naturaleza"* (Vincent *et al.*, 2006) o como "*una disciplina emergente que emula los diseños y procesos de la naturaleza para crear un planeta más sano y sostenible*" (Benyus, 2002).

Por lo general, es una disciplina que ha sido desarrollada durante largo tiempo en campos como la ingeniería o la medicina y con ausencia en la ingeniería de fabricación, sin embargo en los últimos años se han comenzado a desarrollar diversos trabajos de investigación biomimética con aplicaciones a la arquitectura. Michael Pawlyn es un arquitecto pionero en aplicar los principios biomiméticos a este campo y define la biomímesis como "*la imitación funcional de las formas, procesos y sistemas biológicos para producir soluciones sostenibles*" (Pawlyn, 2011). En su libro "*Biomimicry in architecture*" (Pawlyn, 2011) busca soluciones en el mundo natural para construir estructuras más eficientes, fabricar materiales de construcción, crear sistemas de consumo cero, gestionar recursos como el agua, controlar el confort térmico o producir energía para los edificios. Benyus propone tres niveles o escalas de aplicación de la biomímesis: formas, procesos y sistemas (Benyus, 2002) (Baumister *et al.* 2013). A continuación se expone esta clasificación con ejemplos de aplicación en la arquitectura:

- **Nivel formas:** es la imitación de las formas encontradas en la naturaleza. En la arquitectura, este es el nivel o escala de mayor aplicabilidad hasta el momento, donde las geometrías y estructuras halladas en los organismos son utilizadas como inspiración para la creación de sistemas constructivos. Los edificios Centro Eastgate, situado en la ciudad de Harare en Zimbabue y en España el Centro de Investigación Biológica (CIB) del Hospital de Navarra son dos ejemplos de imitación de las formas. El primero (Figura 2.14) fue construido en el año 1996, obra del arquitecto Mick Pearce, y está inspirado en la estructura interna de los termiteros (Figura 2.15) con el fin de lograr un sistema de ventilación y refrigeración pasiva (Turner & Soar, 2008). El proceso de termorregulación consiste en la reducción de ganancia térmica mediante el acristalamiento limitado, los salientes profundos y la masa del edificio, además de la refrigeración nocturna a través de corrientes de aire convectivas. Aunque estas técnicas pasivas no son capaces de lograr todo el control climático del edificio sí que son responsables de beneficios como el 10% de ahorro por adelantado en los costos de construcción al no comprar sistemas de aire acondicionado o un 35% menos de gasto energético anual, comparándolo con edificios de la zona (McKeag, 2009).

Figura 2.14
Centro Eastgate, en Harare, Zimbabue. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Figura 2.15
Termitero. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

El segundo, proyectado por del estudio Vaillo + Irigaray y construido en el año 2013, se ha diseñado teniendo en cuenta diferentes organismos naturales como el camello en la sección funcional del edificio, y la piel multifuncional del oso y la estructura de las hojas de las plantas para la resolución del sistema de fachada (Vaillo Irigaray, 2016). En este nivel además de la aplicación a estructuras arquitectónicas también se encuentran ejemplos de materiales de uso constructivo, como el caso de la pintura StoColor Lotusan® (STO, 2016). Inspirada en la estructura microscópica de las hojas de la flor de loto (*Nelumbo*) que a través de la rugosidad de la superficie proporciona repelencia al agua y al mismo tiempo reduce la adhesión de partículas contaminantes (Barthlott & Neinhuis, 1997) (Figura 2.16) la compañía STO ha creado este material de tecnología Lotus-Effect® para aplicación a fachadas, cuyas propiedades incluyen una reducida humectabilidad con agua, reducción de la adherencia de partículas de suciedad y autolimpieza cuando se expone a la lluvia o la suciedad, además de una protección natural contra algas y hongos.

Figura 2.16
Hojas de la flor de loto, cuya propiedad de repelencia al agua la convierte en una superficie auto-limpiante.
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

- **Nivel procesos:** es la emulación de una serie de operaciones o conductas que crean un mecanismo o producen un efecto. Un ejemplo de aplicación a un tipo de arquitectura regenerativa serían las investigaciones que se están llevando a cabo sobre el proceso en el que ciertos moluscos, como haliótidos (*Haliotidae*), autoensamblan el revestimiento de nácar en su caparazón. También podrían tener aplicación urbanística las investigaciones sobre el comportamiento grupal de ciertos animales como los movimientos de las bandadas de aves o los enjambres de abejas.

- **Nivel sistemas:** es la creación de un sistema integrado que gestiona eficientemente los materiales y energía disponibles en un ciclo continuado al igual que lo hacen los sistemas naturales. En la arquitectura este nivel es el más complejo de ejecutar, y la correspondencia más cercana sería la creación de edificios o comunidades de consumo de energía cero (EEC), donde la energía demandada por el edificio proviene del propio edificio mediante fuentes de energías renovables, aunque para la total emulación de una arquitectura entendida como un ecosistema también habría que tener en cuenta otros factores como el ciclo de vida de los materiales usados en la edificación, la gestión de residuos o la capacidad del conjunto para una posible reutilización o reconversión.

Por último, se presenta un diagrama (Figura 2.17) a modo de síntesis de las principales líneas y grupos de investigación, en torno a la biomímesis, arquitecturas adaptativas o fabricación digital, que han sido tomadas como referencias en la elaboración del presente trabajo.

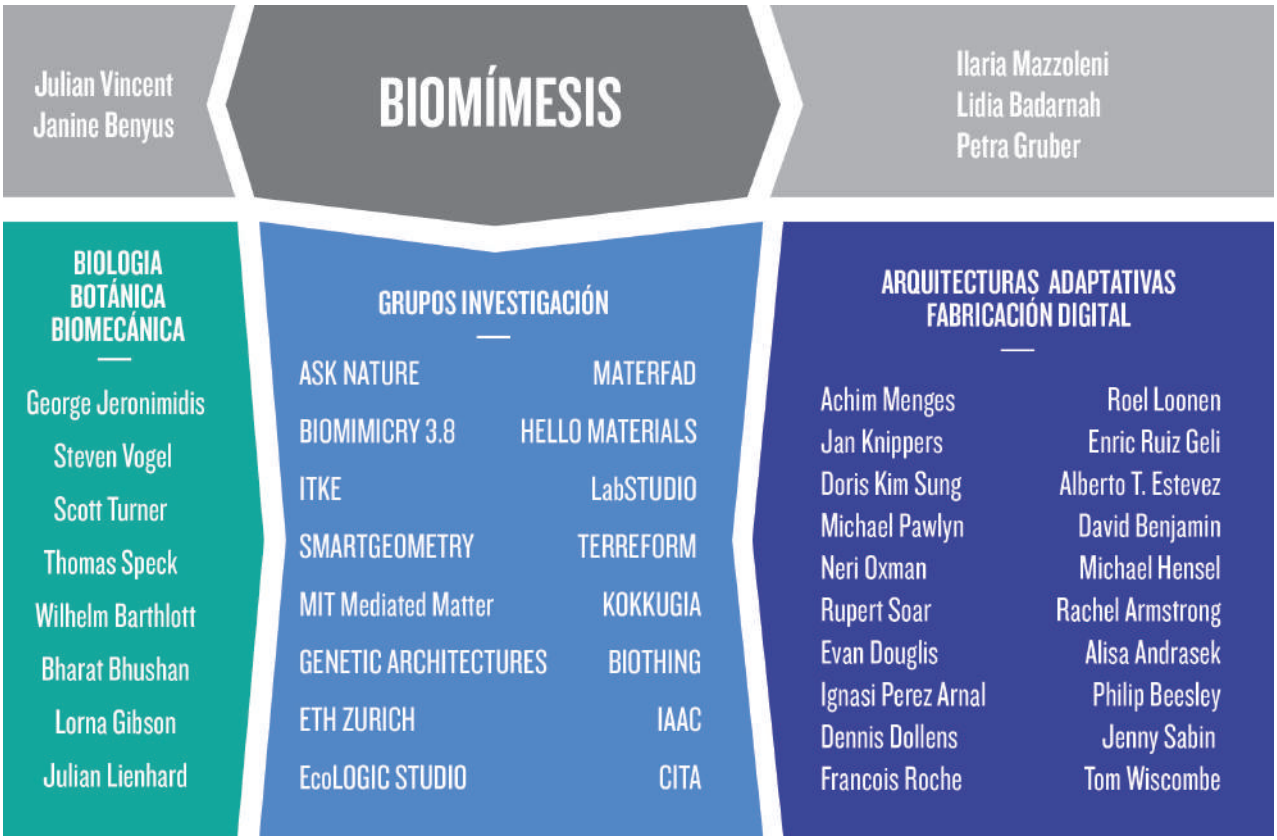


Figura 2.17
Diagrama de líneas y grupos de investigación biología-arquitectura.

2.6 Envolventes arquitectónicas biomiméticas

Anteriormente se ha desarrollado el concepto de adaptación en la Naturaleza y se ha citado cómo las envolventes encontradas en los organismos son superficies multifuncionales que surgen de una compleja interacción entre la morfología superficial y las propiedades físicas y químicas del organismo biológico como respuesta de adaptación al medio. También se han citado diversos ejemplos de carácter general de aplicación de la biomímesis a la arquitectura. A continuación se analiza la biomímesis o biomimética y su aplicación arquitectónica teniendo en cuenta el posible potencial que ofrece a la hora de desarrollar sistemas envolventes para edificios más parecidos a las envolventes de la naturaleza, con capacidad de interactuar con el medio a través de superficies adaptativas.

Emplear la biomimética como herramienta en la arquitectura puede ayudar a desarrollar un nuevo tipo de diseño activo con el medio ambiente (Gruber, 2011). Por tanto, la biomimética puede representar una dirección alternativa para conciliar la eficiencia energética con los requerimientos de confort interior de alta calidad, a través de la adaptabilidad a la envolvente del edificio inspirada en principios de adaptación encontrados en la naturaleza.

Actualmente, las técnicas avanzadas en los procesos de fabricación y construcción ofrecen grandes oportunidades para el desarrollo de envolventes innovadoras que respondan mejor al medio, permitiendo así a las fachadas comportarse como un organismo vivo (Loonen, 2014). En todo caso es importante señalar que la biomímesis no se utiliza para crear una réplica exacta de la naturaleza, sino como una abstracción y una transferencia del principio funcional biólogico (Kennedy *et al.*, 2015).

La biomimética proporciona ideas para ser descubiertas y adaptadas, desde los modelos naturales a sistemas de construcción sostenible. Las lecciones de la Naturaleza son valiosas para ser aplicadas como tecnologías innovadoras para la implementación de las envolventes del futuro (Godfaurd *et al.*, 2005). A diferencia del biomorfismo, que consiste en la simple traducción de formas de los organismos biológicos a la arquitectura, en la biomimética la transferencia de conocimiento se produce en un nivel funcional o de comportamiento, a través del análisis de las estrategias llevadas a cabo, tanto en biología como en ingeniería, para la resolución de problemas (Brayer & Migayrou, 2013).

Sin embargo, la transferencia de la biología a la tecnología no es una tarea fácil. Julian Vincent reflexiona sobre la transferencia de información entre las disciplinas y los procedimientos para identificar los retos de ingeniería en la naturaleza y cómo conectarlos correctamente con las respuestas que nos ofrece el mundo natural (Vincent, 2014). Las posibles razones del fracaso de esta transferencia podrían ser una investigación superficial, la falta de información acerca de las ciencias de la vida, un enfoque no imaginativo o un fenómeno no escalable, siendo la consultoría de expertos en ciencias de la vida la clave del éxito (Gruber, 2008). Por lo tanto, en este nuevo enfoque en el que la biología inspira los procesos de diseño y fabricación, las oportunidades surgen de las colaboraciones multidisciplinares, entre diseñadores y biólogos con rigor científico (Myers, 2012) (Vattam *et al.*, 2008).

2.6.1 Casos de estudio de proyectos construidos

En los últimos años, diversos trabajos de investigación han intentado llevar a cabo diferentes metodologías para desarrollar nuevas envolventes en edificios según principios biomiméticos. A continuación, se exponen algunos de los proyectos construidos, en términos de envolventes adaptativas y su interacción con el medio ambiente a través de intercambios de energía para mejorar su eficiencia. Se trata de de sistemas inspirados en las plantas y que responden al entorno continuamente cambiante a través de la capacidad de movimiento. A través de estos tres sistemas experimentales se puede ver el potencial de la biomímesis como una herramienta de diseño para mejorar la eficiencia energética en edificios.

Caso de estudio 1: Flectofin®

El primer caso de estudio es Flectofin® por ITKE, Institute of Building Structures and Structural Design de la Universidad de Stuttgart (ITKE, 2016). La innovación se inspira en el mecanismo de válvula que la flor de *Strelitzia reginae* (comúnmente conocida como la flor de ave del paraíso) (Figura 2.18) usa para el proceso de polinización. El mecanismo de inspiración de esta flor consiste en una deformación reversible cuando se aplica una fuerza externa. Se trata de una flexión cinética en la naturaleza cuya aplicación técnica resultante opera con una completa ausencia de bisagras basándose sólo en la deformación reversible del material. Este comportamiento adaptativo es abstraído y materializado como Flectofin®: un sistema de lamas sin bisagras, con capacidad de desplazamiento de 90°C debido a la inducción de esfuerzos de flexión en el eje. Estos esfuerzos pueden ser causados por un desplazamiento en el soporte o por el cambio de temperatura en la lámina.

Uno de los amplios campos de aplicación de Flectofin® es como sistema de sombreado exterior adaptativo (Figura 2.19) abriendo nuevas posibilidades para la la implementación de diseños de formas orgánicas (doble curvatura) sin restricción de geometrías.

Los beneficios funcionales, como sistema de sombreado eficiente en los edificios, serían la reducción del consumo de energía mediante sistemas de refrigeración convencionales y la captación de energía pasiva en invierno (Lienhard *et al.,* 2011) (Lienhard *et al.,* 2009) (Schleicher *et al.*, 2015) (Knippers & Speck, 2012) (Bar-Cohen, 2011).

Figura 2.18
Flor de la planta *Strelitzia reginae.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Figura 2.19
Sistema de sombreado basado en el mecanismo Flectofin®. Fuente: ITKE.
Disponible en: www.str-ucture.com

Figura 2.20
Pabellón One Ocean Thematic cuya envolvente se adapta y regula la luz solar.
Fuente:SOMA.
Disponible en: www.soma-architecture.com

Caso de estudio 2: One Ocean Thematic Pavilion

El segundo caso de estudio es el pabellón "*One Ocean Thematic Pavilion*" (Figura 2.20) desarrollado para la Exposición de 2012 en Yeosu, Corea, por la firma SOMA Arquitectura, en colaboración con la oficina de ingeniería Knippers Helbig. Se desarrolló un sistema de envolvente adaptativo inspirado en investigaciones sobre los movimientos de las plantas y mecanismos cinéticos, como el sistema de sombreado Flectofin®, mediante placas ligeramente curvadas que se adaptan y responden a las condiciones cambiantes de luz solar durante el día controlando las condiciones lumínicas del edificio de una forma pasiva. El sistema de sombreado es posible gracias a las deformaciones elásticas, que tradicionalmente en la ingeniería representan casos no deseados, debido al fallo de estabilidad, y que se evitan comúnmente mediante sofisticados refuerzos y análisis no lineales (ITKE, 2016) (Knippers & Speck, 2012) (Schinegger *et al.*, 2012).

Figura 2.21
Detalle del sistema reactivo a la humedad en el pabellón Hygroskin. Fuente: ICD
Disponible en: http://www.achimmenges.net

Caso de estudio 3: HygroSkin

Finalmente, el tercer caso de estudio presentado es el pabellón *"HygroSkin"*, sensible a la meteorología (Figura 2.21) y desarrollado por el equipo de Achim Menges en colaboración con Oliver David Krieg y Steffen Reichert (Menges, 2012) (Reichert *et al.*, 2014). El proyecto consiste en el diseño y fabricación de una envolvente para un pabellón tomando como inspiración el movimiento observado en los conos o piñas de pícea (*Picea*) como respuesta pasiva a los cambios de humedad. HygroSkin utiliza la capacidad de respuesta intrínseca del material, el cual usa la humedad relativa en el ambiente como un activador o disparador verde para interactuar con el ambiente que lo rodea. Se aprovecha la inestabilidad dimensional de la madera con respecto al contenido de humedad para construir una envolvente sensible al clima que se abre y se cierra de manera autónoma como respuesta a los cambios climáticos, sin requerir el suministro de energía para funcionar ni ningún tipo de control mecánico o electrónico. Las aberturas responden a los cambios de humedad relativa dentro de un rango de 30% a 90%, modulando la transmisión de luz y la permeabilidad visual de la envolvente (Menges, 2011) (Knippers *et al.*, 2012) (Krieg *et al.*, 2014). El potencial de la investigación, en términos de eficiencia energética, ha sido desarrollar una envolvente adaptativa que no requiere ningún equipo sensorial o estímulo eléctrico, basado en principios biomiméticos.

2.6.2 Casos de estudio teóricos

Al tratarse la biomímesis de una ciencia de reciente desarrollo se ha estimado necesario otorgar de especial relevancia a trabajos teóricos, que aunque no se hayan ejecutado materialmente crean metodologías para una posible aplicación de la biomímesis a las envolventes arquitectónicas. Por tanto, además de los proyectos construidos expuestos anteriormente, a continuación se analizan y comparan otros trabajos de investigación académica. Los estudios teóricos *"BioSkin"* (Gosztonyi *et al.*, 2010) de Susanne Gosztonyi y Petra Gruber; *"Towards the living envelope"* (Badarnah, 2012) de Lidia Badarnah o *"Architecture follows nature"* (Mazzoleni, 2013) de Ilaria Mazzoleni, son, con diferencia, algunas de las líneas más relevantes donde los principios biológicos son estudiados para su aplicación en metodologías biomiméticas innovadoras de generación de diseños conceptuales de envolventes en edificios.

Caso de estudio 1: BioSkin

En *"BioSkin"*, los autores exploran el potencial de la biomimética para identificar soluciones innovadoras en la naturaleza para el desarrollo de las nuevas fachadas eficientes del futuro (Gruber & Gosztonyi, 2010). Se crea una base de datos basada en la identificación de 240 organismos biológicos para una posible transferencia al diseño de envolventes. La base de datos resultante sintetiza varios modelos de la naturaleza, incluyendo todo tipo de animales, plantas, paredes celulares, productos de animales como la seda de araña o fenómenos como la inteligencia de enjambre (Gosztonyi *et al.*, 2010) (Imhof & Gruber, 2009) (Imhof & Gruber, 2013)

Caso de estudio 2: Towards the living envelope

En *"Towards the living envelope"* la autora propone una metodología estratégica, a través de diferentes aspectos funcionales y estrategias encontradas en la naturaleza, para la generación de diseños conceptuales de envolventes. Esta metodología de diseño biomimético se organiza de acuerdo con cuatro aspectos ambientales importantes como son el aire, el calor, el agua y la luz, para los cuales se crean diferentes diseños conceptuales (Badarnah, 2012). Así, por ejemplo, se desarrolla un sistema de recogida de agua, basado en diferentes mecanismos de regulación del agua en la naturaleza en lugar de limitarse a una sóla estrategia u organismo específico: el lagarto diablo espinoso del desierto de Australia (*Moloch horridus*) que bebe agua a través de su piel, el escarabajo del desierto de Namibia (*Onymacris unguicularis*) que recoge y condensa el agua de niebla gracias a las protuberancias en su caparazón, la distribución del agua según las nervaduras de las hojas de las plantas o incluso el sistema de evaporación en la piel humana (Badarnah & Kadri, 2014). Otro caso desarrollado es un sistema para regular la temperatura a través de la envolvente, basado en diferentes estrategias de termorregulación en organismos que reducen la pérdida de energía por calentamiento o aumentan la eficiencia de refrigeración disipando el exceso decalor, como por ejemplo la disipación de calor en los termiteros, la retención de calor en los pingüinos a través de sus plumas o la regulación de calor a través de los vasos sanguíneos (Badarnah *et al.*, 2010) (Badarnah & Fernandez, 2015).

Caso de estudio 3: Architecture follows nature

"Architecture follows nature" explora diferentes sistemas de piel en animales y cómo se pueden relacionar estas estrategias funcionales con el diseño de envolventes para edificios. Esta investigación proporciona inspiración biológica para futuros desarrollos de diseño arquitectónico, nuevas tecnologías de edificación y diseño de materiales. La metodología propuesta se organiza de acuerdo a cuatro funciones de las pieles: comunicación, termo-regulación, balance hídrico y protección. En base a las estrategias de adaptación de varios animales a sus climas y hábitats se diseñan un total de doce proyectos de protoarquitecturas o diseños conceptuales para envolventes de edificios. Se desarrolla, por ejemplo, una envolvente para invernaderos que se ajusta y cambia según las condiciones ambientales, recolectando el agua de lluvia mediante un sistema de almohadillas que se deforman permitiendo la apertura o el cierre según el grado de humedad en la atmósfera al modo en que la babosa banana de California (*Ariolimax californicus*) usa su mucosidad en la piel para regular el intercambio de aire y agua a través de su piel. Otro proyecto desarrollado se basa en el sistema de captación de agua de los escarabajos del desierto de Namibia (*Onymacris unguicularis*) para diseñar envolventes con capacidad de captar agua de la niebla y usarlo para crear un microclima habitable en zonas desérticas. Otros organismos estudiados, para una posible transferencia a términos arquitectónicos, son el silfo celeste, la estrella de mar ocre, los hipopótamos, el leopardo de las nieves o el oso polar (Mazzoleni, 2013).

2.6.3 Contribución de la tesis: De las plantas a la arquitectura

A diferencia de los estudios biomiméticos anteriormente comentados, la investigación presentada en esta tesis se basa sólo en las hojas de las plantas y sus estrategias de adaptación a diferentes climas. Las plantas, debido a su inmovilidad como individuos, son un excelente material biológico para detectar fenómenos climáticos. Los animales, a diferencia de las plantas, pueden ocultarse o buscar protección de los elementos y por ello son rechazados como fuente de inspiración en esta investigación. Se busca la relación entre las plantas y los edificios a través de esa falta de movimiento y la sujeción o permanencia a una ubicación específica, lo que implica la exposición a los cambios ambientales y la resistencia a las condiciones climáticas que les afectan en todo momento. Sin embargo, las plantas, a diferencia de los edificios, han sabido adaptarse al medio a través de procesos de evolución a lo largo de millones de años (Figura 2.22). Por ello, se estudian las estrategias de adaptación desarrolladas únicamente por las plantas a su entorno en diferentes áreas climáticas. Dichas adaptaciones son el punto clave de este trabajo y es lo que lo hace diferente de otros estudios de temática similar.

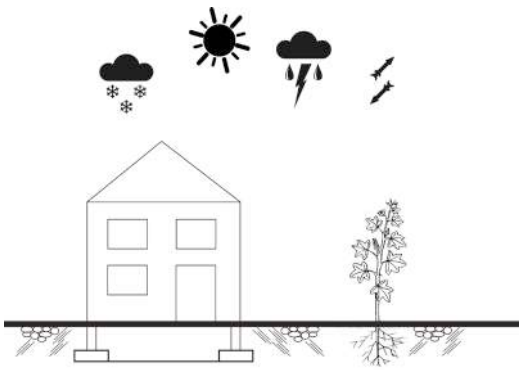


Figura 2.22
Carencia de desplazamiento tanto en las plantas como en los edificios.

Otras investigaciones también se han fijado en las plantas para una posible transferencia a términos arquitectónicos. Petra Gruber elaboró una aproximación general a proyectos arquitectónicos inspirados en plantas (Gruber, 2009), y las investigaciones de Lidia Badarnah sobre el estudio de la gestión de luz en las plantas (Badarnah & Knaack, 2008) o de los sistemas de sombreado (Badarnah, 2016) como ejemplos naturales de iluminación, filtrado o aprovechamiento de la luz como aplicaciones potenciales en edificios. Sin embargo, estos proyectos abordan el estudio de las plantas desde un tipo de adaptación morfológica, según orientación o parámetros geométricos y de distribución (Kobayashi *et al.,* 1998) y no tomando como prioridad la adaptación al clima, que es la clave de esta tesis y lo que marca la diferencia con el resto de investigaciones.

2.7 Soluciones de adaptación en las plantas

La adaptación es especialmente evidente en los organismos que son capaces de sobrevivir a condiciones ambientales severas, como es el caso de las plantas en cualquier hábitat extremo del planeta. Como se ha explicado en el punto anterior, las plantas, debido a su inmovilidad a diferencia de los animales, han desarrollado medios especiales de protección contra los cambios ambientales de luz, humedad, fuego, temperatura, congelación o viento. Estas adaptaciones se desarrollan a lo largo del tiempo y las generaciones como respuesta a un entorno en constante cambio. Por ello, en esta investigación se considera que las superficies de las hojas de las plantas responden a la definición de envolvente dadas sus características de multifuncionalidad, adaptación y dinamismo, que sumado a la carencia de desplazamiento al igual que los edificios, hace que este trabajo se centre únicamente en las adaptaciones de las hojas de las plantas a diferentes climas.

Como ya se ha citado anteriormente la adaptación de los organismos vivos a su entorno se produce de tres maneras: morfológica, fisiológica y etológica (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Estos tres tipos de adaptación se explican a continuación a través de ejemplos de las plantas. Sin embargo, aunque esta clasificación es la considerada universal en términos biológicos, más adelante se expondrá una nuevo enfoque para ordenar las adaptaciones de las plantas, en términos de mecanismos dinámicos y estrategias estáticas, como parte de la metodología de diseño para facilitar la transferencia de la biología a la arquitectura.

2.7.1 Morfológica o estructural

Adaptación relativa a la anatomía de la planta incluyendo la forma, el tamaño, el patrón o la estructura, permitiéndole una mejor funcionalidad para la supervivencia en ese entorno. Un ejemplo es la pubescencia o la aparición de pelos en las hojas, como en el caso de la *Gynandriris setifolia* (Figura 2.23). Estos pelos, utilizados para reflejar la luz solar de su superficie, son una adaptación a ambientes secos y cálidos. Otro ejemplo sería la transformación de hojas en espinas en los cactus, con el fin de protegerse del ataque de los animales y al mismo tiempo reducir la evaporación de agua dadas las condiciones de sequía y aridez típicas del desierto.

Figura 2.23
Hojas peludas de *Gynandriris setifolia* como ejemplo de adaptación morfológica. Fuente: elaboración propia.

2.7.2 Fisiológica o funcional

Adaptación que representa cambios en el funcionamiento de la planta, generalmente relacionada con procesos químicos como respuesta sistémica del individuo frente a un estímulo externo específico para mantener la homeostasis. Algunas plantas usan la fotosíntesis CAM (proveniente del inglés *Crassulacean Acid Metabolism*), esto es, metabolismo ácido de las crasuláceas (Azcón-Bieto & Talón, 2000), como una adaptación a las condiciones áridas para aumentar la eficiencia en el uso del agua, y por lo tanto se encuentra típicamente en plantas que crecen en condiciones áridas (Ezcurra, 2006) como por ejemplo la *Echeveria glauca* (Figura 2.24).

Figura 2.24
Hojas de *Echeveria glauca* como ejemplo de adaptación fisiológica.
Fuente: elaboración propia.

2.7.3 Etológica o de comportamiento

Adaptación relativa a la forma de actuar de una planta como medida de supervivencia. Este tipo de adaptación está vinculado a un sistema de retroalimentación de señal y respuesta, en el que el comportamiento marca una interacción entre la planta y su entorno. Las plantas modifican sus respuestas ante determinados estímulos con la finalidad de subsistir, desarrollarse o reproducirse. Un ejemplo de esta adaptación son las hojas que se cierran bajo varios estímulos, como la *Mimosa pudica* (Figura 2.25), que se pliega hacia adentro como reacción al contacto.

Figura 2.25
Hojas de *Mimosa pudica* como ejemplo de adaptación etológica.
Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

2.8 Conclusiones

A diferencia de los sistemas estáticos y convencionales para fachadas, se propone la creación de un nuevo tipo de envolvente arquitectónica, para mejorar el rendimiento energético en los edificios a través de la adaptabilidad al entorno. Se define el tipo de envolvente arquitectónica "viva" como aquella que responde y gestiona las condiciones ambientales cambiantes tanto interiores como exteriores. Las envolventes arquitectónicas "vivas" tienen la capacidad de cambiar con el tiempo a través de estrategias de adaptación para anticiparse a las variaciones ambientales exteriores, así como a las actividades interiores y sus interacciones con los usuarios, con el objetivo de contribuir al ahorro de energía empleada en calefacción, refrigeración, ventilación o iluminación, así como mejorar la calidad ambiental interior de los edificios.

Se propone, por tanto, el desarrollo de sistemas envolventes para edificios más parecidos a las envolventes encontradas en la naturaleza, y para ello, se plantea la biomimética como una dirección alternativa a los procesos convencionales de diseño constructivo. El objetivo es conciliar la eficiencia energética con los requerimientos de confort interior de alta calidad, a través de la adaptabilidad de la envolvente inspirada en principios de adaptación encontrados en la naturaleza.

Este trabajo está basado en el estudio de los mecanismos y estrategias de adaptación de las hojas de las plantas a diferentes climas, y en el próximo capítulo será explicada una metodología de diseño que facilite la transferencia desde la biología hacia la arquitectura.

Conclusions

Unlike static and conventional façade systems, a new type of adaptive architectural envelope is needed to improve energy efficiency in buildings. The type of living architectural envelope is defined as that which responds to and manages changing environmental conditions both indoors and outdoors. The living architectural envelopes have the capacity to change over time through adaptation strategies in order to anticipate external environmental variations. Also, the façade changes as a response to indoor activities and its interactions with users, with the aim of saving energy as well as improving the indoor environmental quality of buildings.

Therefore, the development of enveloping systems for buildings more similar to the envelopes found in Nature is proposed. Biomimetic is suggested as an alternative way to match energy efficiency with the requirements of high quality interior, through the buildings' envelope adaptation inspired by the principles found in Nature.

This work is based on the study of plants adaptation to different climates (mechanisms and strategies). A design methodology to ease the transfer from biological principles to architectural resources will be explained in the next chapter.

Referencias

Addington M, Schodek D., (2004) *Smart materials and technologies. for the archi- tecture and design professions.*Oxford, United Kingdom: Architectural Press.

Allianz Arena, Herzog & De Meuron, Projects, Munich, disponible en https://www. herzogdemeuron.com (consultado en 2016)

Arab World Institute, Jean Nouvel, Projects, Paris. disponible en http:// www.jeannouvel.com (consultado en 2016)

Armstrong R., (2012) *Living architecture: how synthetic biology can remake our cities and reshape our lives.* TED Books.

Azcón-Bieto J, Talón M., (2000) *Fundamentos de fisiología vegetal*.Barcelona: McGraw-Hill Interamericana.

Badarnah L., (2012) *Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope adaptation.* Delft University of Technology.

Badarnah L, Kadri U., (2014) *A methodology for the generation of biomimetic design concepts.* Archit Sci Rev. http://dx.doi.org/10.1080/ 00038628.2014.922458.

Badarnah L, Nachman Farchi Y, Knaack U., (2010) *Solutions from nature for building envelope thermoregulation.* In: Carpi A, Brebbia CA (editors). Proceedings of the fifth design & nature conference on comparing design and nature with science and engineering. Southampton: WITpress.

Badarnah L, Fernandez JE., (2015) *Morphological configurations inspired by nature for thermal insulation materials.* In: Proceedings of the international association for shell and spatial structures (IASS) Symposium, Future Visions, Amsterdam.

Badarnah L, Knaack U., (2008) *Organizational features in leaves for application in shading systems for building envelopes.* In: Brebbia CA (editor). Proceedings of the fourth International design & nature conference on comparing design in nature with science and engineering. WITpress: Southampton. p. 87–96.

Badarnah L., (2016) *Light management lessons from nature for building applications.* Procedia Eng;145:595– 602. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.049.

Bar-Cohen Y., (2011) *Biomimetics: nature-based innovation.* New York: CRC Press Taylor & Francis Group.

Baumeister D, Tocke R, Dwyer J, Ritter S, Benyus J. (2013). *The Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices.* Biomimicry 3.8: Missoula.

Beesley P., (2006) *Responsive architectures: subtle technologies.* Canada: Riverside Architectural Press.

Benévolo L., (1979) *Historia de la arquitectura moderna*; Barcelona: Gustavo Gili.

Benyus JM., (2002) *Biomimicry: innovation inspired by nature*. 2nd ed.. New York: H. Collins Pub.

Berkoz E, Yilmaz Z., (1987) *Determination of the overall heat transfer coefficient of the building envelope from the bioclimatic comfort point of view*. Archit Sci Rev;30(4):117–21.

Bloom, Kim Sung, D., disponible en http://www.dosu-arch.com/bloom.html (consultado en 2016)

Brayer MA, Migayrou F., (2013) Archilab 2013: *Naturalizing architecture:* Hyx, Orleans; 2013.

Bustamante W., (2009) *Guia de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social, Ministerio de Vivienda y Urbanismo*. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa País de Efi- ciencia Energética (CNE), Santiago de Chile.

Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI., (2011) *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review.* Renew Sustain Energy Rev;15(3):1675–95. http://dx.doi.org/10.1016/ j.rser.2010.11.018.

Cantrell BE, Holzman J., (2015) *Responsive landscapes: strategies for responsive technologies in landscape.* Architecture. New York: Routledge.

Chávez del Valle FJ., (2002), *Zona variable de confort térmico*. Universitat Politécnica de Catalunya.

Coelho M, Maes P., (2009) *Shutters: a permeable surface for environmental control and communication.* In: Proceedings of the third international conference on tangible and embedded interaction, Cambridge, UK.

Corbusier Le, (1991) *Precisions: on the present state of architecture and city planning* (1930), english translation. Cambridge, MA: MIT Press.

Davies, M., (1981) *A Wall for all seasons + Uses for glass in building*, Riba Journal-Royal Institute of British Architects, 88 pp. 55-57.

De Boer BJ, Ruijg GJ, Loonen RCGM, Trcka M, Hensen JLM, Kornaat W., (2011) *Climate adaptive building shells for the future – optimization with an inverse modelling approach.* In: Proceedings of the ECEEE Summer Study 2011, Belambra Presqu'île de Giens, France, June 2011. – Presqu'île de Giens: Technische Universiteit Eindhoven; p. 1413–22.

Del Grosso AE, Basso P., (2010) *Adaptive building skin structures.* IOP Sci Mater Struct.

Dent AH, Sherr L.,(2014) *Material innovation: architecture Media-ICT*. London: Thames & Hudson; p. 180–3.

Dobzhansky T, Hecht MK, Steere WC., (1968) *On some fundamental concepts of evolutionary biology.* 1st ed.Evolutionary Biology, 2. . New York: Appleton- Century-Crofts; p. 1–34.

Estévez, A, (2005) *Arquitectura Biomórfica*, publicado en: Genetic Architectures/Arquitecturas Genéticas II, SITE Books/ESARQ-UIC, Santa Fe (USA) / Barcelona.

Estévez A., (2009) *Al margen: escritos de arquitectura*, Madrid, Abada.

European Commission. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. Energy Roadmap 2050, Com 2011;2011:885/2., disponible en http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/ com_2011_8852_en.pdf (consultado en 2016)

European Commission. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. Horizon 2020 - The Framework Pro- gramme for Research (and Innovation); 2011 disponible en http://eur-lex.europa.eu/ legal- content/EN/TXT/PDF/?uri 1/4 CELEX:52011DC0808&from 1/4 EN (consultado en 2016)

Ezcurra E., (2006) *Natural history and evolution of the world's deserts, global deserts outlook.* United Nations Environment Programme:1–27.

Fiorito F, Sauchelli M, Arroyo D, Pesenti M, Imperadori M, Masera G, Ranzi G., (2016) *Shape morphing solar shadings: a review.* Renew Sustain Energy Rev;55:863–84. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser. 2015.10.086.

Forbes, P. (2005) *The Gecko's Foot: Bio-inspiration - Engineering New Materials and Devices from Nature.* New York, NY: WW Norton & Co. Inc.

Fortmeyer R, Linn C., (2014) *Kinetic architecture: design for active envelopes.* Mul- grave: Images Publishing. Geli ER. Cloud 9. Media-ICT Building, Barcelona, Actar 2011.

Geli ER, Rifkin J., (2010) *A green new deal, from geopolitics to biosphere politics.* Barcelona, Actar.

Godfaurd J, Clements-Croome D, Jeronimidis G. (2005) *Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world.* Build Environ;40 (3):319–28 ISSN 0360-1323 http://dx.doi.org/10.1016/ j.buildenv.2004.05.011.

Gosztonyi S, Gruber P, Judex F, Brychta M, Richter S., (2010) *BioSkin – research potentials for biologically inspired energy efficient façade components and systems*, BioSkin Online Plattform. Project information FFG, Vienna; disponible en: http://www.bionicfacades.net//.

Grosso AE, Basso P. Design concepts for adaptive multi-functional building envelopes. In: Proceedings of the 6th ECCOMAS thematic conference on smart structures and materials, SMART 2013: Turin, Italy; 2013.

Gruber P., (2011) *Biomimetics in architecture – the architecture of life and buildings.* Vienna: Springer; http:// dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0332-6.

Gruber P., (2008) *Transfer of nature to architecture – analysis of case studies.* Biological Approaches for Engineering Conference, University of Southampton, UK.

Gruber P, Gosztonyi S., (2010) *Skin in architecture: towards bioinspired facades.* WIT Transactions on Ecology and the Environment, vol. 138. WIT Press.

Gruber P., (2009) *Biomimetics in architecture – inspiration from plants.* In: Proceedings of the 6th plant biomechanics conference, Cayenne.

Hallegatte, S., Henriet, F. and Corfee-Morlot, J., (2008) *The Economics of Climate Change Impacts and Policy Benefits at City Scale: A Conceptual Framework*, Environment Working Papers No. 4, OECD, Paris.

Hasselaar BLH., (2006) *Climate adaptive skins: towards the new energy-efficient façade*. WIT Trans Ecol Environ;99:351–60.

IEA, (2008) International Energy Agency, *World Energy Outlook*, OECD/IEA, Paris.

Imhof B, Gruber P., (2009) *BIORNAMETICS - architecture defined by natural patterns.* PEEK project submission Austrian Science Fund FWF.

Imhof B, Gruber P., (2013) *What is the Architect doing in the Jungle? Biornametics* Springer Vienna Architecture.

ITKE. Institute of building structures and structural design, bio-inspired kinematics for adaptive shading systems, Flectofins: a hinge-less flapping mechanism inspired by nature, disponible en http://www.itke.uni- stuttgart.de

Kamal-Chaoui L, Robert A., (2009) *Competitive cities and climate change*, OECD regional development working papers no, 2. OECD Publishing.

Knaack, U, Klein, T, Bilow, M, Auer, T, (2007) *Façades: Principles of Construction*, Basel, Birkhäuser.

Kennedy E, Fecheyr-Lippens D, Hsiung B, Niewiarowski PH, Kolodziej M., (2015) *Biomimicry: a path to sustainable innovation*. Design Issues, Summer 2015, 31. Massachusetts Institute of Technology. p. 66– 73. http://dx.doi.org/ 10.1162/ DESI_a_00339.

Kim D. Sung Metal that breathes, TEDxUSC, disponible en https://www.ted.com/talks/doris_ kim_sung_metal_that_breathes (consultado en 2016)

Knippers J, Speck T., (2012) *Design and construction principles in nature and architecture*. IOP Sci Bioinspiration Biomimetics;7.

Kobayashi H, Kresling B, Vincent JFV., (1998) *The geometry of unfolding tree leaves.* In: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. http:// www.dx.doi.org/10.1098/ rspb.1998.0276.

Krieg OD, Christian Z, Correa D, Menges A, Reichert S, Rinderspacher K, Schwinn T., (2014) *Hygroskin: meteorosensitive pavilion*. In: Proceedings of the Fabricate 2014 Conference Zurich; 2014.

Leatherbarrow D, Mostafavi M., (2002) *Surface architecture*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Lee ES, Selkowitz SE., (1998) *Integrated envelope and lighting systems for com- mercial buildings: a retrospective.* Paper presented at the ACEEE 1998 summer study on energy efficiency in buildings.

Lienhard J, Schleicher S, Poppinga S, Masselter T, Milwich M, Speck T, Knippers J., (2011) *Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature.* IOP Sci Bioinspiration Biomimetics;6(4).

Lienhard J, Poppinga S, Schleicher S, Masselter T, Speck T, Knippers J., (2009) *Abstraction of plant movements for deployable structures in architecture.* In: Thibaut B, (editor). Proceedings of the 6th plant biomechanics conference. Cayenne: French Guyana; pp. 389–97.

Loonen RCGM., (2010) *Climate adaptive building shells, what can we simulate?* Eindhoven (The Netherlands): Technische Universiteit Eindhoven.

Loonen RCGM, Favoino F, Hensen JLM, Overend M., (2016) *Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades.* J Build Perform Simul.

Loonen RCGM, Trcka M, Cóstola D, Hensen JLM., (2013) *Climate adaptive building shells: state-of-the-art and future challenges.* Renew Sustain Energy Rev;25:483–93. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser. 2013.04.016.

Loonen RCGM., (2015) *Bio-inspired adaptive building skins, biotechnologies and biomimetics for civil engineering.* Springer; http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4_5.

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles.* J Facade Des Eng;3(1):2015. http://dx.doi.org/10.3233/ FDE-150026.

Mavrigiannaki A, Ampatzi E., (2016) *Latent heat storage in building elements: a systematic review on properties and contextual performance factors*. Renew Sustain Energy Rev;60:852–66. http://dx.doi.org/10.1016/j. rser.2016.01.115.

Mazzoleni I., (2013) *Architecture follows nature-biomimetic principles for innovative design*.New York: CRC Press.

McKeag, T., (2009) *How Termites Inspired Mick Pearce's Green Buildings*, GreenBiz, disponible en https:// www.greenbiz.com/blog/2009/09/02/how-termites-inspired-mick-pearces-green-buildings (consultado en 2016)

Media-ICT Building CZFB 22@, Barcelona, Enric Ruiz-Geli - Cloud 9, Projects, disponible en http://www.ruiz-geli.com (consultado en 2016)

Menges A., (2012) *Biomimetic design processes in architecture: morphogenetic and evolutionary computational design.* IOP Sci. Bioinspiration Biomimetics;7.

Menges A., (2012) *HygroScope – meteorosensitive morphology.* In: Gattegno N, Price B, (editors). Project catalogue of the 32nd annual conference of the association for computer aided design in architecture (ACADIA), San Francisco; p. 21–4.

Menges A., (2012) *Material computation - higher integration in morphogenetic design*, architectural design, London: Wiley Academy.

Knippers J, Menges A, Gabler M, La Magna R, Waimer F, Reichert S, Schwinn T., (2012) *From nature to fabrication: biomimetic design principles for the production of complex spatial structures.* In: Hesselgren L, Sharma S, Wallner J, Baldassini N, Bompas P, Raynaud J, editors. Advances in architectural geometry. Wien New York: Springer. p. 107–22.

Menges A., (2011) *Integrative design computation: integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions.* In: Proceedings of the 31th conference of the association for computer aided design in architecture (ACADIA); p. 72– 81.

Myers W., (2012) *Beyond Biomimicry*, Bio Design: Nature, Science, Creativity.London: Thames & Hudson.

National Aquatics Center (Water Cube), ARUP, Projects, Beijing, disponible en https://www.arup.com (consultado en 2016)

Omrany H, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A, Raahemifar K, Tookey J., (2016) *Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: a comprehensive review.* Renew Sustain Energy Rev;62:1252–69. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.010.

Oral GK, Yilmaz Z., (2003) *Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view*. Energy Build;35:383–8.

Oxman, N., (2012) *Computación material,* Fabvolution: Avances en la Fabricación Digital. Ajuntament de Barcelona, Barcelona pp. 57-64

Oxman, N., (2010) *Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials.* Architectural Design, Special Issue: The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. Volume 80 pp. 78-85

Pawlyn M., (2011) *Biomimicry in architecture.*London: RIBA Publishing.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C. (2008). *A review on buildings energy consumption information.* Energy and Buildings, 40(3):394–398.

Reichert S, Menges A, Correa D., (2014) *Meteorosensitive architecture: biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness.* Comput-Aided Des;60:50– 69. http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010.

Rheault S, Bilgen E., (1990) *Experimental study of full-size automated venetian blind windows.* Solar Energy;44(3):157–60.

Schinegger K, Rutzinger S, Oberascher M, Weber G., (2012) *One ocean: theme pavilion EXPO 2012.* Yeosu, Residenz Verlag.

Schleicher S, Lienhard J, Poppinga S, Speck T, Knippers J., (2015) *A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture*. Comput Aided Des;60.

The Eden Project: The Biomes, Grimshaw Architects, Projects, London, disponible en http:// grimshaw-architects.com (consultado en 2016)

Sadineni SB, Madala S, Boehm RF., (2011) *Passive building energy savings: a review of building envelope components.* Renew Sustain Energy Rev;15:3617– 31. http://dx.doi. org/10.1016/j.rser.2011.07.014.

Soar, R., Andreen, D., (2011) *The Role of Additive Manufacturing and Physiomimetic Computational Design for Digital Construction.* Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design Architectural Design, Vol. 82. Wiley Academy, London (2011)

Spiller, N., Armstrong, R., (2011) *It's a Brand New Morning, Protocell Architecture.* Architectural Design, Vol. 81. Wiley Academy, London.

Skou A., (2013) *Future buildings: tough and smart on energy efficiency.* Research*eu results magazine, Issue 23. CORDIS Unit, Publications Office of the European Union, disponible en http:// bookshop.europa.eu/en/research-eu-results-maga zine-pbZZAC13005/ (consultado en 2016)

Stevanovic S., (2013) *Optimization of passive solar design strategies: a review.* Renew Sustain Energy Rev;25:177–96. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.028.

(STO) Sto Group, StoColor Lotusan®, disponible en http://www.sto-sea.com/en/company/ innovations/sto- lotusan-/sto-color-lotusan.html (consultado en 2016)

Turner J, Soar R, (2008). *Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building.* Proceedings of the first International Conference on industrialized, intelligent sustainable construction (I3CON), Loughborough, UK. Hassan T. & Ye J. (eds.)

Ürge-Vorsatz D, Eyre N, Graham P, Harvey D, Hertwich E, Jiang Y, *et al.* (2012), Chapter 10 – energy end-use: building.*Global energy assessment – toward a sustainable future.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press; Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis; p. 649–760.

Ürge-Vorsatz D, Cabeza LF, Serrano S, Barreneche C, Petrichenko K., (2015) *Heating and cooling energy trends and drivers in buildings.* Renew Sustain Energy Rev;41:85–98. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser. 2014.08.039.

Vaillo Irigaray, disponible en: http://www.vailloirigaray.com/portfolio/biomedical-research-centre/ (consultado Diciembre 2016)

Vattam S, Helms M, Goel A, Yen J, Weissburg M., (2008). *Learning about and through biologically inspired design.* In: Proceedings of the Second Design Creativity Workshop, Atlanta.

Vincent J, Bogatyreva O, Bogatyrev N, Bowyer N, Pahl K., (2006) *Biomimetics: its practice and theory.* J R Soc Interface;3(9):471–82. http://dx.doi.org/ 10.1098/rsif.20 06.0127.

Vincent JFV., (2001) *Stealing ideas from nature*, Volume 412 of the series International Centre for Mechanical Sciences. p. 51–8. doi: http://www.dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-2584-7_3.

Wang J, Beltrán LO, Kim J., (2012) *From static to kinetic: a review of acclimated kinetic building envelopes.* Denver, CO; p. 4022–9.

Watson, D., (1997) *Architecture, Technology and Environment.* Journal of Architectural Education, 51.

Wigginton M, Harris J., (2002) *Intelligent skins*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Zhai Z, Previtali JM., (2010) *Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation.* Energy Build;42 (3):357–65. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.002.

Zuk W, Clark RH., (1970) *Kinetic architecture.* New York: Van Nostrand Reinhold.

Sedum

CAPÍTULO 3

Naturalizando el diseño

"Estudia la naturaleza, ama la naturaleza, permanece cerca de la naturaleza. Nunca te fallará."

Frank Lloyd Wright

CHAPTER 3

Naturalizing design

Abstract

The work developed in this thesis begins with an immersion in the natural world, specifically in the botany, since the innovation in the buildings from the inspiration in the plants is strategically sought. In order to achieve this objective, it is essential to understand the specific behavior of adaptation to different climatic conditions (e.g, the functional specialization, which is obtained by studying the morphological features of the leaves). Addressing research from an engineering point of view seems essential to find out how different teams around the world have developed plant bioinspired design strategies in recent years.

Systems found in Nature offer a large database of strategies and mechanisms that can be implemented in biomimetic designs. However, the selection of such natural models and their transfer into technology is a challenge that engineers and architects have to face. Biomimetic research processes include various levels of abstraction and modification, involving experts from various fields, such as biologists, chemists, physicists, engineers or architects, making biomimetics an extremely interdisciplinary science (Speck & Speck, 2008). In the literary review two approaches are observed in the biomimicry methodology, depending on the problem to be solved: “bottom-up” and “top-down” (Speck & Speck, 2008), also called “biology to design” and “chal-lenge to biology”, respectively (Baumister *et al.,* 2013).

This research is developed joining both beginning with the problem definition about façades not adapted to climate conditions. To solve this problem, research looks at Nature looking for biological inspiration. Plant leaves are analyzed in order to find an improvement to inert and static solutions in the buildings envelopes. This chapter presents the methodology to generate conceptual designs of envelopes, according to a selec-tion of different strategies and mechanisms of adaptation of some plants to their respective habitats. The proposed methodology, called *“From plants to architecture”*, consists of several stages, which accompany different images, diagrams and tables in order to facilitate the transition from biological inspiration to technical implementation by providing a useful tool for the concept design generation of living architectural envelopes.

3.1 Metodología biomimética

3.1.1 Introducción

El trabajo desarrollado en esta tesis parte de una inmersión en el mundo natural, más concretamente en la botánica, ya que se busca la innovación en las envolventes de los edificios desde la inspiración en las plantas. Para lograr alcanzar este objetivo resulta imprescindible entender de los comportamientos específicos de adaptación a las diferentes condiciones climáticas, esto es la especialización funcional, lo cual se obtendrá mediante el estudio de las características morfoanatómicas de las hojas de las plantas. Al abordar la investigación desde un perfil de ingeniería parece esencial realizar una búsqueda de cómo diferentes equipos alrededor de todo el mundo han desarrollado estrategias de diseño bioinspirado en plantas en los últimos años. El diagrama inferior (Figura 3.1) recoge los principales referentes, conceptos y grupos de investigación que se han tenido en cuenta a la hora de establecer una línea de trabajo para llevar a cabo la transferencia de conocimiento desde las adaptaciones de las plantas al desarrollo de innovadoras implementaciones técnicas.

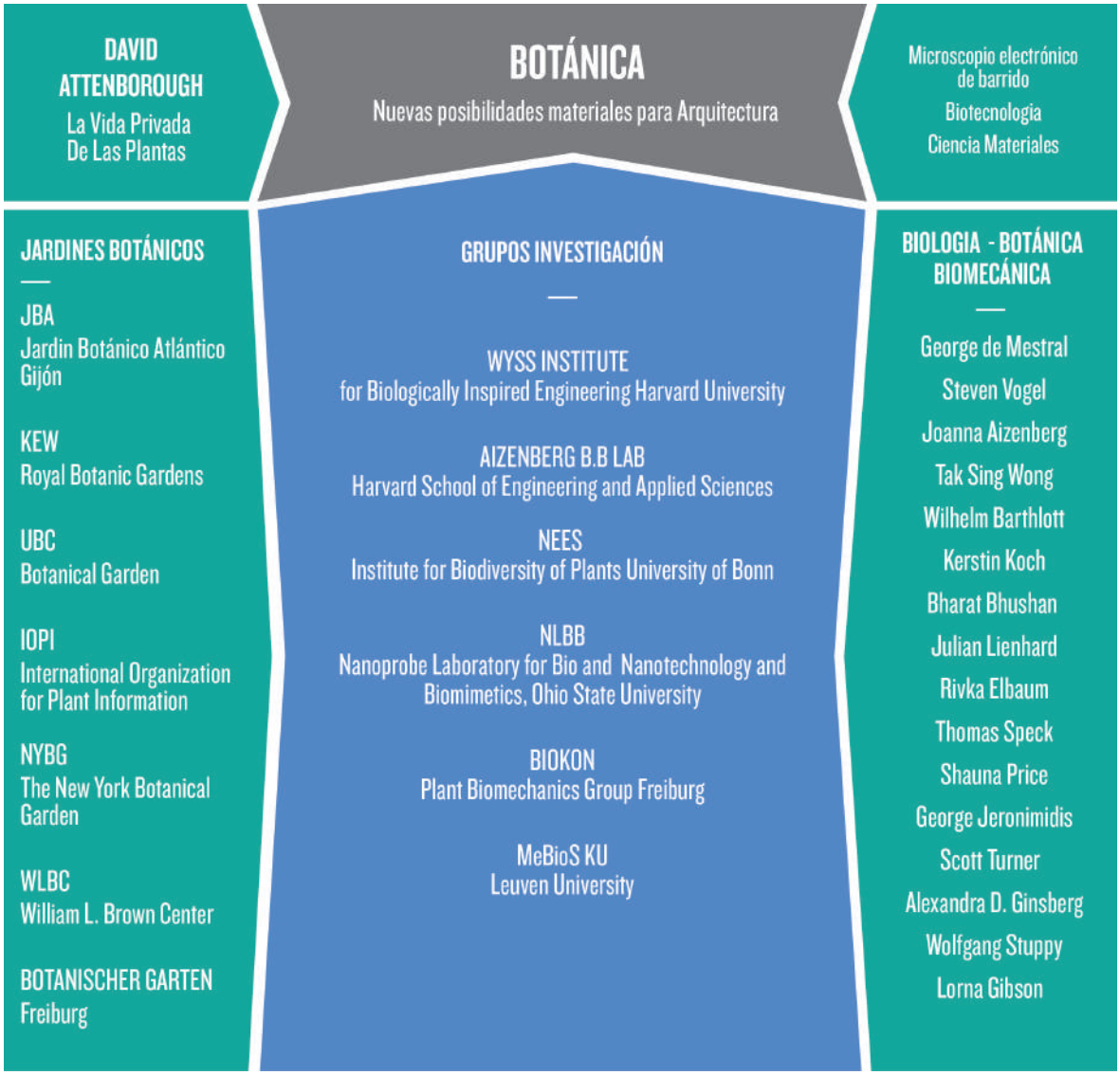


Figura 3.1 Diagrama de los principales referentes, conceptos y grupos de investigación que se han tenido en cuenta a la hora de establecer una línea de trabajo.

3.1.2 Procesos en el diseño biomimético

Los sistemas encontrados en la naturaleza ofrecen una gran base de datos de estrategias y mecanismos que pueden implementarse en diseños biomiméticos. Sin embargo, la selección de dichos modelos naturales y su transferencia tecnológica es un desafío al que se enfrentan los ingenieros y arquitectos. Diversos grupos de investigación han desarrollado estrategias para la generación de conceptos de diseño inspirados en la naturaleza. Se detallan a continuación los tres que más se han consultado en la elaboración de este trabajo:

- **BioTriz:** es un proyecto que surgió para ampliar con datos biológicos el sistema TRIZ (Vincent *et al.*,2006). En 1946, el inventor soviético Genrich Altshuller, creó el sistema TRIZ (Teoría para Resolver Problemas de Inventiva), el cual intenta definir patrones generales en el proceso de invención basándose en el análisis de bases de datos de patentes en diversos campos técnicos (Lerner, 1991). BioTriz es un método que nace de un grupo de investigación de la Universidad de Bath, Reino Unido, y establece las reglas para desarrollar una versión "bio" o "verde" de TRIZ, usando la Naturaleza como fuente de ideas para el desarrollo de nuevas soluciones técnicas. BioTriz es un método para la resolución de problemas a través de una base de datos biológicos (Bogatyreva *et al.*, 2002) (Bogatyreva *et al.*, 2003). Esta base de datos se organiza según una matriz que ofrece diversos principios biológicos como posibles soluciones al problema definido (Vincent *et al.,* 2006).

- **Biomimicry 3.8:** es una consultora de bio-inspiración que ofrece asesoramiento en innovación desde la inspiración en la Naturaleza (BIOMIMICRY 3.8, 2016). El Instituto Biomimético, fundado en 1998 por Janine Benyus y Dayna Baumister, proporciona diferentes recursos sobre cómo utilizar los fenómenos biológicos como inspiración en la resolución de problemas, como por ejemplo la biblioteca digital gratuita *"AskNature"* de soluciones biológicas para multitud de retos, desde la conservación de la energía hasta la producción de alimentos. Como ya se ha explicado en el apartado 2.5 del capítulo anterior, Benyus propone tres niveles o escalas de aplicación de la biomímesis: formas, procesos y sistemas (Benyus, 2002) (Baumister *et al.,* 2013). En el sector de la construcción, estos tres niveles se pueden implementar en diferentes escalas de resultados, desde la creación de nuevos materiales hasta estrategias de diseño urbanístico.

- **Plant Biomechanics Group:** liderado por el profesor Thomas Speck, este grupo de investigación del Jardín Botánico de la Universidad de Freiburg, Alemania, estudia los aspectos biomecánicos, funcionales y morfológicos de las plantas para una posible abstracción y desarrollo de prototipos tecnológicos (PBG). Tras una selección de organismos, como modelos con potencial de desarrollo técnico, analizan sus principios estructurales y funcionales para una posible fase de fabricación, como el caso Flectofin® (Lienhard *et al.*, 2011) (Knippers & Speck, 2012) visto en el capítulo 2.

Los procesos de investigación biomimética incluyen varios niveles de abstracción y modificación, en los que intervienen expertos de diversas áreas, como biólogos, químicos, físicos, ingenieros o arquitectos, haciendo de la biomímesis una ciencia extremadamente interdisciplinar (Speck & Speck, 2008). Respecto a la metodología biomimética, en la revisión literaria se observan, principalmente, dos enfoques o aproximaciones, dependiendo del problema a resolver. A continuación se detalla cada uno de ellos.

3.1.2.1 Proceso de abajo hacia arriba

Proceso *bottom-up* (Speck & Speck, 2008) ó *biology to design* (Baumister *et al.,* 2013): en este enfoque se parte de la investigación biológica, y desde el estudio de las formas, procesos o sistemas orgánicos surgen nuevos proyectos biomiméticos para implementaciones técnicas prometedoras aplicables a la resolución de problemas en diversos campos como medicina, energía, transporte o ciencia de los materiales (Kennedy *et al.*, 2015). El desarrollo de proyectos biomiméticos que siguen este proceso consta de las siguientes etapas: analizar la biomecánica y la morfología funcional del organismo biológico; comprender detalladamente las estructuras, formas y funciones biológicas; abstraer los principios descubiertos del modelo biológico y por último la implementación técnica y su introducción al mercado. En la literatura se pueden encontrar bajo otros nombres como *biomimetics by induction* (Gebeshuber & Drack, 2008) ó *solution-based* (Vattam *et al*., 2007).

Un ejemplo de proyecto biomimético desde la inspiración biológica a la implementación técnica sería el velcro (Figura 3.2), el cual surgió desde la observación del enorme potencial de las semillas cubiertas de ganchos de la planta bardana (*Arctium*) por parte del ingeniero suizo George de Mestral en 1941. Según el enfoque *bottom-up* las etapas en el desarrollo de este proyecto serían:

1. **Análisis** de la biomecánica y la morfología funcional del la semilla de *Arctium*, que consistía en un mecanismo de cientos de ganchos con capacidad de agarrarse de forma instantánea a cualquier superficie con bucles como el pelo o la ropa, y a su vez podía ser desenganchada con una leve fuerza.

2. **Abstracción** de los principios descubiertos del modelo biológico, en este caso el mecanismo de cierre gancho-bucle.

3. **Valoración** del mecanismo estudiado a través de una tormenta de ideas de posibles diseños bioinspirados y evaluación de su potencial para una posible transferencia tecnológica.

4. **Implementación técnica** y su introducción al mercado: en 1955 se patentó el cierre de gancho y bucle bajo el nombre Velcro®, palabra derivada de las palabras francesas *velours* (terciopelo) y *crochet* (gancho) (Bhushan, 2009) (WIPO, 2016) (VELCRO, 2016).

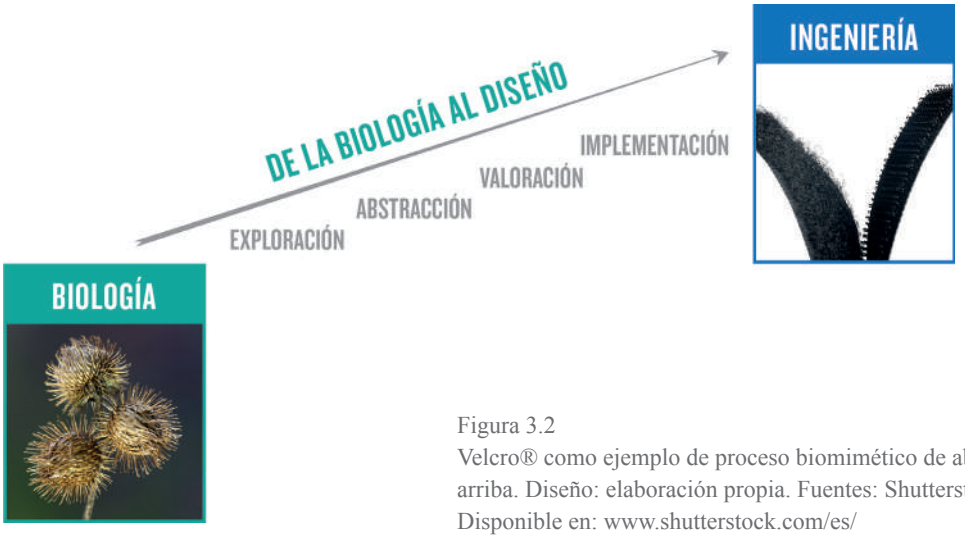


Figura 3.2
Velcro® como ejemplo de proceso biomimético de abajo hacia arriba. Diseño: elaboración propia. Fuentes: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

3.1.2.2 Proceso de arriba hacia abajo

Proceso *top-down* (Speck & Speck, 2008) ó *challenge to biology* (Baumister *et al.* , 2013): en este caso se parte de un problema técnico existente y se realiza una búsqueda de analogías biológicas para obtener una mejora e innovación del producto ya existente. Este proceso se desarrolla a través de las siguientes etapas: definir con precisión el problema técnico a solventar; buscar ejemplos de posibles soluciones en la naturaleza; selección de la solución biológica que parece más prometedora para la resolución del problema; abstracción de la solución encontrada de su ejemplo natural para una correcta transferencia y por último la implementación técnica y su introducción al mercado. En la literatura se pueden encontrar bajo otros nombres como *biomimetics by analogy* (Gebeshuber & Drack, 2008) ó *problem-based* (Vattam *et al.*, 2009).

Un ejemplo de proyecto biomimético desde la inspiración biológica a la implementación técnica sería el rediseño de los trenes de alta velocidad en Japón (Figura 3.3). Según el enfoque *top-down* las etapas en el desarrollo de este proyecto serían:

1. **Definición del problema:** el tren bala Shinkansen Sanyo Serie 500 alcanzaban velocidades cercanas a los 350 kilómetros por hora pero también generaba una explosión sónica cada vez que se entraba en un túnel (McKeag, 2012)(Kobayashi, 2005).

2. **Exploración** en la Naturaleza: para solucionar este problema el ingeniero Eiji Nakatsu buscó inspiración en las anatomías de las aves, resultando el martín pescador el organismo mejor adaptado a un cambio repentino en la resistencia del aire. Este pájaro es capaz de zambullirse a gran velocidad desde el aire a otro mucho más denso, el agua, sin apenas salpicar (McKeag, 2012) (Kobayashi, 2005).

3. **Abstracción** del modelo estudiado: la morfología del pico del martín pescador, que le permitía entrar tan limpiamente al agua sin salpicar, fue la base en el proceso de rediseño del tren (McKeag, 2012)(Kobayashi, 2005).

4. **Implementación técnica:** en 1997 el nuevo tren comenzó a operar, logrando reducir el efecto de explosión sónica, además de otros beneficios como la disminución en un 30% de resistencia al aire lo que implicó la reducción del consumo energético (McKeag, 2012) (Kobayashi, 2005).

Figura 3.3
Rediseño de los trenes de alta velocidad en Japón, como ejemplo de proceso biomimético de arriba hacia abajo. Diseño: elaboración propia. Fuentes: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

3.1.2.3 Proceso en "De las plantas a la arquitectura"

Esta investigación se desarrolla según un enfoque que podría considerarse la combinación de los dos explicados previamente (Figura 3.4). Por un lado, la falta de adaptabilidad de las fachadas de los edificios a las condiciones climáticas específicas de cada lugar sería la definición del problema como punto de partida en la investigación. Sin embargo, la exploración de las plantas como inspiración biológica de adaptabilidad al medio se realiza como un proceso de descubrimiento. Este proceso consiste en la observación de un fenómeno interesante en la naturaleza, y cómo esta percepción desencadena una idea de aplicación, en lugar de comenzar con un esfuerzo consciente para desarrollar una solución biomimética.

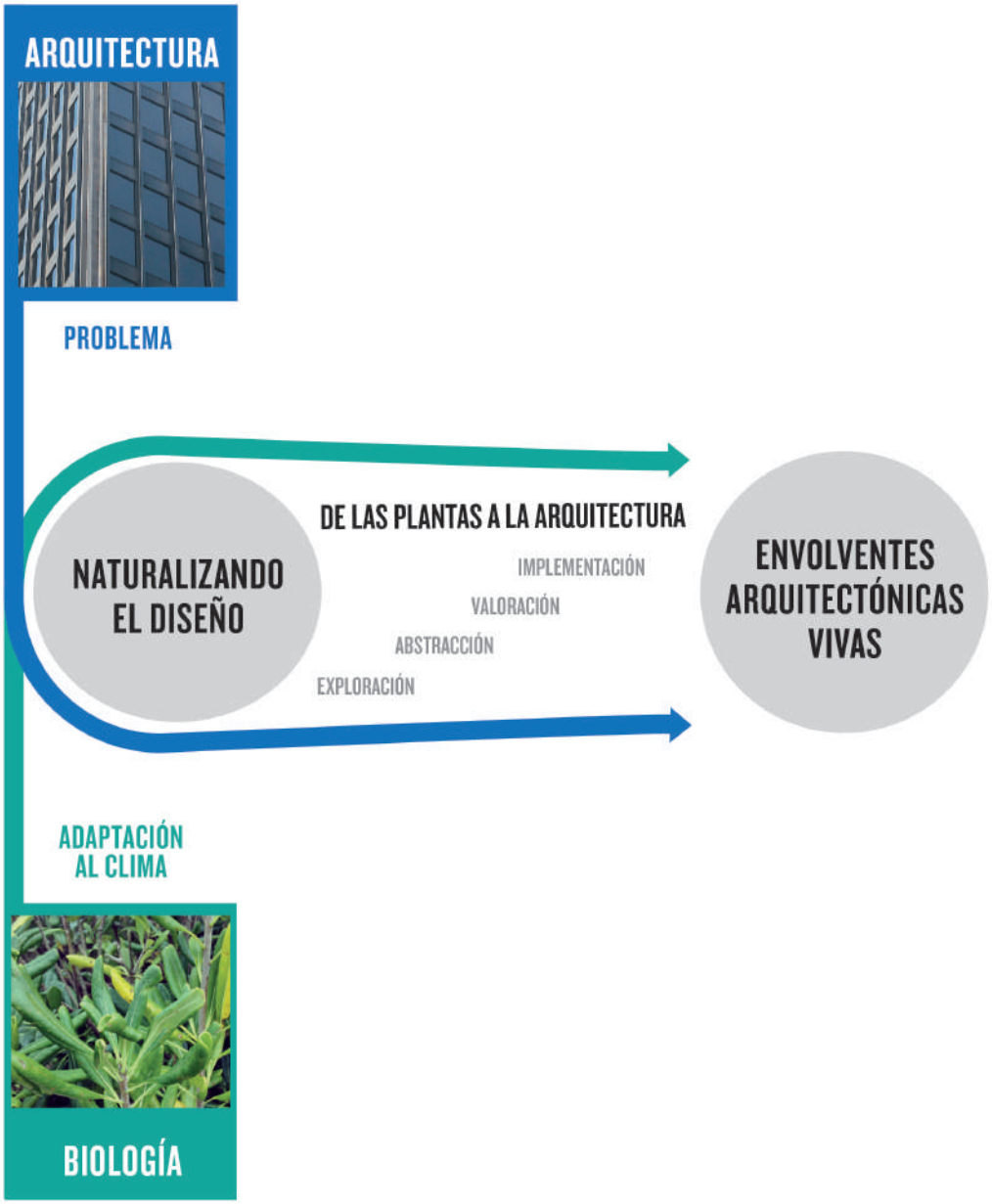


Figura 3.4
Proceso biomimético seguido en "De las plantas a la arquitectura"

A lo largo de este capítulo se presenta la metodología "De las plantas a la arquitectura" para generar diseños conceptuales de envolventes, de acuerdo a una selección de diversas estrategias y mecanismos de adaptación de algunas plantas a sus respectivos hábitats. La metodología propuesta consiste en diversas fases de trabajo (Figura 3.5), las cuales se detallan a lo largo de este capítulo, que acompañadas de diferentes diagramas, esquemas y tablas facilitan la transición desde la inspiración biológica hacia la implementación técnica aportando una herramienta útil para la generación de diseños conceptuales de envolventes arquitectónicas vivas.

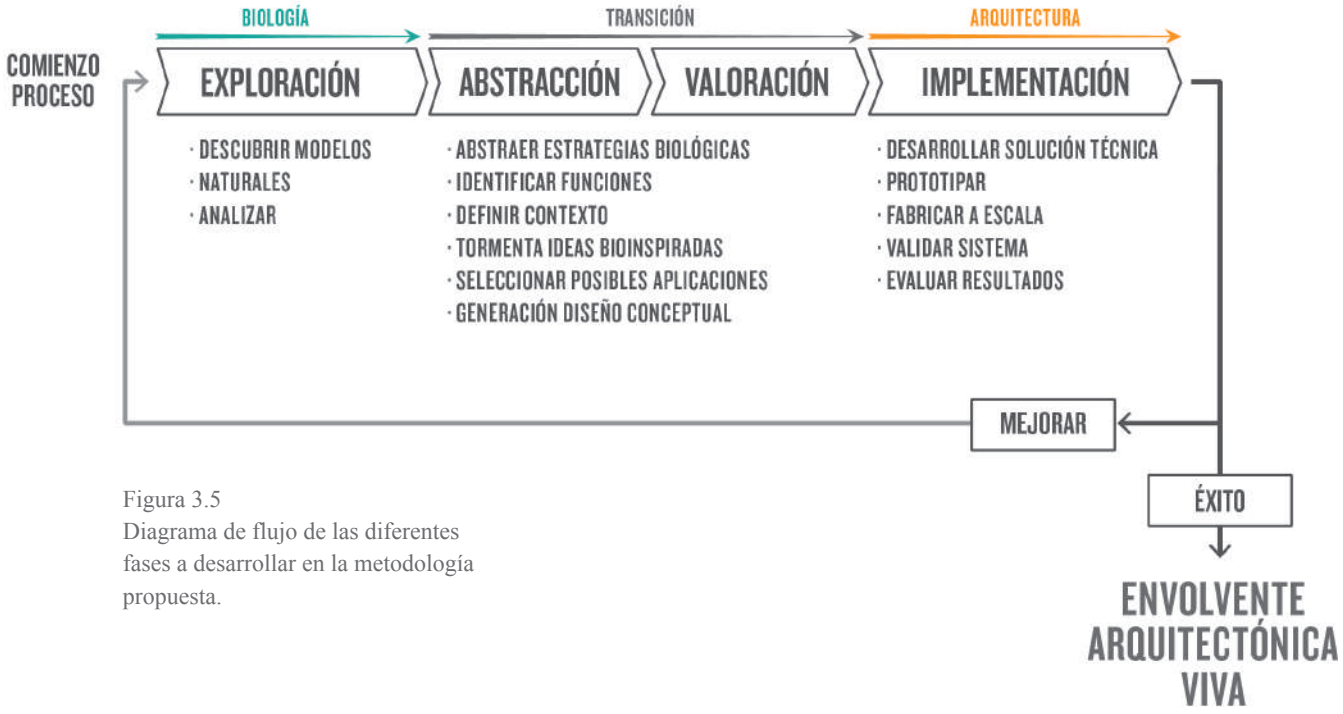


Figura 3.5
Diagrama de flujo de las diferentes fases a desarrollar en la metodología propuesta.

Las fases en el proceso de transferencia de la biología a la ingeniería son las siguientes:

- **Exploración** de la biomecánica y morfología funcional del sistema biológico, en este caso las hojas de las plantas en los diferentes climas europeos definidos. Durante esta fase resulta imprescindible la colaboración de carácter interdisciplinar y en la investigación aquí presentada se ha contado con la asesoramiento del Equipo Científico del Jardín Botánico Atlántico de Gijón y del Departamento de Biología de la Universidad de Oviedo. Dicha colaboración se ha llevado a cabo con el objetivo de profundizar en el análisis y comprensión de la fisiología vegetal a través de una directa observación de la naturaleza, mediante la recogida y estudio de muestras representativas de la biodiversidad vegetal en las diversas áreas climáticas europeas.

- **Abstracción** de los principios biológicos extraídos del modelo natural, a través de la síntesis de la información obtenida. Traducción de las estrategias biológicas obtenidas en estrategias de diseño, con el objetivo de facilitar la interpretación de las lecciones de la biología según soluciones de diseño, en lenguaje de diseño y sin depender de complejos términos biológicos. La estrategia de diseño incluye una tormenta de ideas sobre posibles soluciones bioinspiradas de acuerdo a la identificación y definición de funciones requeridas en la envolvente arquitectónica.

- **Valoración** y selección de ideas con potencial de aplicación al desarrollo de envolventes. Generación de diseños conceptuales como fase de diseño preliminar.

- **Implementación técnica** de los diseños conceptuales seleccionados. Esta fase incluye el desarrollo de los conceptos en soluciones técnicas, el prototipado de los diseños y la fabricación de los elementos a escala, mediante la aplicación de tecnologías avanzadas. Los últimos pasos son la validación del sistema y la evaluación de los resultados, mediante técnicas de medición ya establecidas en la industria.

3.2 Parámetros ambientales

Antes de abordar la presentación de la metodología propuesta en la tesis, a continuación se introducen los parámetros ambientales y las relaciones que establecen con la planta y el edificio, dada su relevancia a la hora de afrontar todas las etapas en el proceso de investigación.

Las condiciones climáticas están continuamente cambiando, y los diferentes parámetros ambientales variables provocan situaciones a las que, tanto los organismos naturales como los edificios, deben hacer frente. La envolvente del edificio y la hoja de la planta son las interfaces que gestionan la relación entre el interior de los edificios y las plantas con el medio exterior que los rodea. La distribución de las plantas a través de la tierra no es aleatoria sino que depende de sus adaptaciones a las circunstancias de cada zona.

A diferencia de los edificios, que como seres inertes no interactúan con el entorno, la disponibilidad y condiciones de luz, agua y temperatura son los factores clave que determinan la distribución de los seres vivos en cada región (García, 2011). Dado que el objetivo de esta investigación es la creación envolventes capaces de relacionarse con el medio de un modo adaptativo al igual que lo hacen las hojas de las plantas, se estima primordial comprender estas relaciones con el ambiente. De entre todos los parámetros ambientales existentes, en este estudio se han considerado la temperatura, la humedad, la luz y el dióxido de carbono como los factores principales que afectan a las plantas a través de las hojas (Figura 3.6) y a los edificios a través de la envolvente y (Figura 3.7). A continuación se detalla cada parámetro y su relación con las hojas y las envolventes respectivamente.

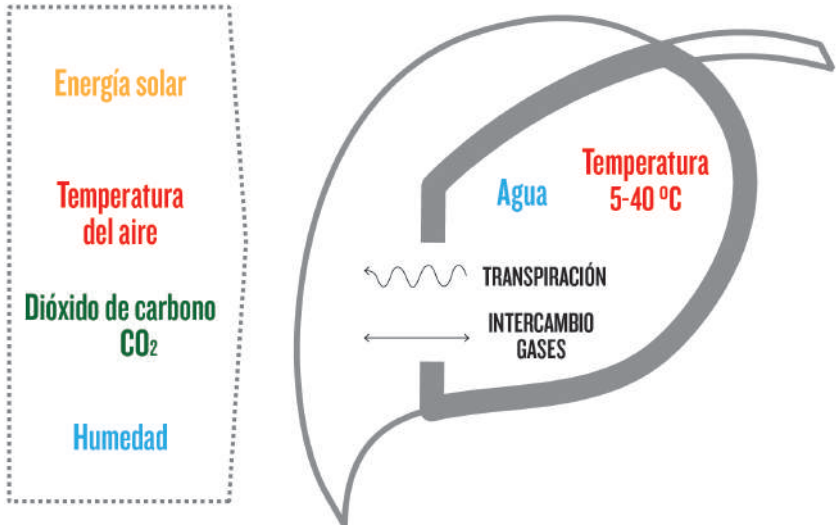


Figura 3.6
Parámetros ambientales exteriores (izquierda); funciones de relación exterior-interior a través de la superficie foliar; y variables en el interior de la hoja.

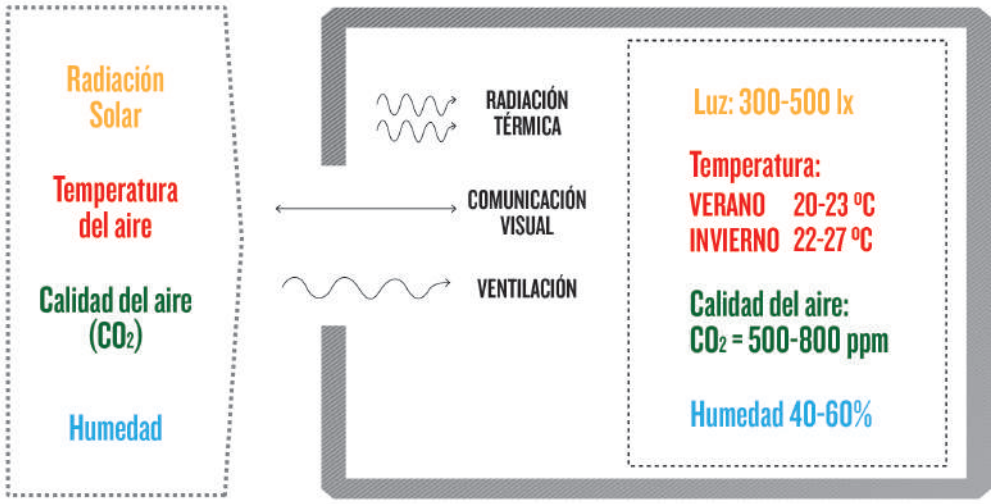


Figura 3.7
Parámetros ambientales exteriores (izquierda); funciones de relación exterior-interior a través de la envolvente; y valores recomendados para proporcionar condiciones de confort interno.

3.2.1 Temperatura

Planta

La temperatura es un factor clave en el metabolismo de los seres vivos, el cual exige temperaturas dentro de unos márgenes muy precisos. El frío excesivo ralentiza la respiración y deteriora los tejidos más expuestos, y temperaturas demasiado altas dañan o destruyen las estructuras moleculares y membranas celulares (García, 2011). Dentro de unos límites de entre -10ºC y 50ºC, a las plantas les beneficia el calor para sus reacciones metabólicas. En cambio cuando las temperaturas son bajas sus funciones vitales se ven frenadas. Las plantas son poiquilotermos, por lo que su temperatura varía con el ambiente y sus funciones dependen de él. En general, las plantas requieren temperaturas comprendidas entre 5 y 40ºC, aunque existe una variación en los umbrales a los que pueden desarrollar la fotosíntesis, necesitando temperaturas altas en los climas cálidos mientras que en climas fríos la fotosíntesis se realiza más eficazmente con temperaturas bajas. De esta forma, las plantas que crecen en regiones frías son capaces de incorporar el dióxido de carbono a temperaturas cercanas a los 0ºC, mientras que las que habitan regiones cálidas pueden realizar la actividad fotosintética a temperaturas de 50ºC, demostrando así la capacidad de adaptación a la temperatura (Taiz & Zeiger, 2007) (García, 2011).

Los valores de temperatura son variables a lo largo del día y de las estaciones, además de diferir entre el suelo y la atmósfera, aunque esta investigación se centra en la temperatura de la atmósfera y su relación con la planta a través de las hojas. Las hojas realizan el intercambio de calor con la atmósfera mediante radiación, convección o transpiración. La primera se refiere a la absorción de calor de su entorno, el cual se puede irradiar al aire circundante cuando su temperatura es menor, por ejemplo durante la noche. La convección y conducción es la transferencia de calor al aire ambiental y depende de la morfología foliar y la velocidad del viento, por ejemplo las hojas de menor tamaño con altas velocidades de viento intercambiarán el calor por convección más rápidamente. Por último, mediante la transpiración se produce un intercambio de calor latente hacia el ambiente, suponiendo hasta el 50% de la pérdida de calor en la planta (Vogel, 2012). En los próximos capítulos se estudiarán los diversos efectos que tiene la temperatura de la atmósfera sobre en las plantas, y se explorarán las adaptaciones que han desarrollado las plantas en los diferentes climas para resistir al calor o al frío, evitando el estrés por calor y choque térmico, o el enfriamiento y congelación respectivamente.

Edificio

Según la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) "*el confort ó bienestar térmico es aquel estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es evaluado de forma subjetiva*". La sensación de confort térmico en el interior del edificio depende de parámetros variables en el usuario, según su vestimenta y su actividad física, y de variables ambientales como son la temperatura del aire interior, la temperatura superficial interior de la envolvente, la humedad relativa del aire y la velocidad del aire (Givoni, 1969) (RITE, 2016). De acuerdo al Documento Básico de Ahorro de energía del Código Técnico de la Edificación (DB-HE, 2016), los edificios dispondrán de instalaciones térmicas apropiadas destinadas a proporcionar el bienestar térmico de sus ocupantes, mediante el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016) y su aplicación en el proyecto del edificio.

Tomando como referencia los documentos de los reglamentos estándar como los del CTE, RITE ó los creados por la ASHRAE, la temperatura recomendada en el interior de los edificios se estima en torno a los 20-23ºC en invierno y los 22-27ºC en verano. Para alcanzar estos niveles de confort térmico en los espacios habitables se tendrán en cuenta las solicitaciones exteriores e interiores, según el perfil de uso. Las primeras se refieren a las acciones del clima, en términos de temperatura y radiación solar, sobre el edificio con efecto sobre su comportamiento térmico Las solicitaciones interiores son las cargas térmicas generadas en el interior del edificio debidas a los aportes de energía de los ocupantes, equipos e iluminación. En los próximos capítulos se estudiarán diversas estrategias para alcanzar condiciones de confort térmico interior mediante el diseño de envolventes arquitectónicas "vivas" según los parámetros variables de cada zona climática.

3.2.2 Humedad

Planta

En las plantas, el agua constituye una parte muy importante de su volumen, pudiendo alcanzar hasta el 90% de la composición de las hojas (García, 2011). La absorción de agua se realiza a través de las raíces y aquella que no se utiliza en la fotosíntesis se pierde en forma de vapor a través de las superficies de los órganos exteriores, sobre todo de las hojas. Este movimiento de agua desde la hoja a la atmósfera es la transpiración. Existen conflictos entre los requerimientos de la planta respecto al agua, pues la pérdida de vapor de agua es una consecuencia inmediata del necesario intercambio gaseoso realizado durante la fotosíntesis (Taiz & Zeiger, 2007) (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Además, la energía solar recibida aumenta la temperatura de la hoja, lo que hace incrementar la pérdida de agua por evaporación pues el agua transpirada permite el enfriamiento de la planta. La disponibilidad de agua en el ambiente afectan directamente a la distribución de las plantas así como al funcionamiento de la transpiración. El agua es proporcionada por las precipitaciones, en forma de lluvia y nieve, y el rocío o condensación de la humedad del aire en forma de gotas. Así en climas muy húmedos las plantas deben forzar la transpiración o desarrollar estrategias para evitar la absorción de agua, y por el contrario en ambientes cálidos y secos deben desarrollar estrategias para evitar la sequía y conservar el agua (Alcaraz, 2013) (Vogel, 2012). En los próximos capítulos se estudiarán las adaptaciones que han desarrollado las plantas en los diferentes climas para alcanzar el equilibrio hídrico, es decir lograr la conservación de agua al mismo tiempo que realizan un eficaz intercambio gaseoso con el medio.

Edificio

De acuerdo con el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016), las condiciones interiores de humedad relativa se establecen entre los valores 45-60% en verano y 40-50% en invierno. Además de estos parámetros reguladores del confort interior para los usuarios, el Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (DB-HS, 2016) junto con el Reglamento (RITE, 2016) de Calidad del aire interior -IDA- en función del uso del edificio, regulan los aspectos de salubridad mediante la ventilación para el control de la calidad del aire. Niveles de baja humedad relativa pueden influir en la calidad del aire interior, provocando efectos dañinos de irritación ocular o en las vías respiratorias del ocupante (Wolkoff & Kjærgaard, 2007).

La ventilación es el proceso de renovación del aire del interior del edificio para limitar el deterioro de su calidad, realizándose mediante entrada de aire exterior y evacuación de aire viciado. El movimiento de aire y la temperatura son factores influyentes en la moderación de los niveles de humedad interior, y mediante el uso de la carta psicrométrica como herramienta se pueden establecer las relaciones entre la temperatura y la humedad relativa del aire para representar las condiciones ambientales en el espacio interior del edificio o el diagrama de confort para la obtención de las soluciones de bienestar más óptimas (Bustamante, 2009). En los próximos capítulos se estudiarán diversas estrategias para alcanzar condiciones de calidad del aire interior, según el nivel de humedad relativa, mediante el diseño de envolventes arquitectónicas vivas dependiendo de los parámetros variables de cada zona climática.

3.2.3 Luz

Planta

La luz es un parámetro que todas las plantas necesitan para sobrevivir, pues la fotosíntesis exige la presencia de energía en forma de luz, entre otros factores. La energía solar que incide sobre las plantas les proporciona luz y calor, variando el desarrollo de cada una según la iluminación del ambiente en el que vive, diferenciando entre plantas de luz -heliófilas- y de sombra -esciófilas-, o incluso en la misma planta hojas de sol y hojas de sombra (García, 2011) (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Las condiciones de luz son variables, pues el tiempo diario de exposición cambia a lo largo del año dependiendo de la latitud y las plantas han desarrollado diferentes adaptaciones en función de este fotoperiodo. La luz también provoca competencias entre las comunidades vegetales, manifestándose en forma de ambientes estratificados, con significativas variaciones en la intensidad luminosa recibida (Alcaraz, 2013) (Vogel, 2012). En los próximos capítulos se estudiarán las adaptaciones que han desarrollado las plantas en los diferentes climas para alcanzar las condiciones lumínicas óptimas en cada medio, viendo cómo influye la luz sobre la características morfoanatómicas de las hojas.

Edificio

La luz solar es una fuente de energía natural y variable a lo largo del día y la época del año en cada emplazamiento, teniendo influencia directa en el comportamiento lumínico y térmico del edificio, y en consecuencia sobre las demandas para alcanzar los respectivos niveles de confort. El confort lumínico se alcanza cuando la distribución de la luz permite al ocupante ver los objetos sin provocar cansancio o molestia, mediante el máximo aprovechamiento de la iluminación natural, o en su ausencia mediante el uso de luz artificial sin olvidarse del uso eficiente de la energía. De acuerdo a las exigencia del Documento Básico de Ahorro de energía del Código Técnico de la Edificación (DB-HE, 2016),los edificios dispondrán de instalaciones de iluminación adecuadas a las necesidades de sus usuarios y a la vez eficaces energéticamente disponiendo de un sistema de control que permita ajustar el encendido según la ocupación, así como de un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural. En los próximos capítulos se estudiarán diversas estrategias para alcanzar condiciones de confort lumínico interior mediante el diseño de envolventes arquitectónicas vivas que optimicen el aprovechamiento de la luz solar en cada zona climática.

3.2.4 Dióxido de carbono

Planta

La atmósfera se compone principalmente de nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y dióxido de carbono (0,033%), aunque esta proporción se puede ver alterada por la contaminación que provocan principalmente la quema de combustibles fósiles y también ciertos gases, partículas sólidas o productos químicos, aumentando la concentración de dióxido de carbono (Taiz & Zeiger, 2007) (Alcaraz, 2013). Las consecuencias de este aumento del dióxido de carbono atmosférico junto con el aumento de temperatura asociada al efecto invernadero pueden influir en la fotosíntesis. La fotosíntesis exige la presencia de gas carbónico, además de la energía solar y el agua citados anteriormente. El dióxido de carbono se difunde desde la atmósfera a las hojas, haciendo variar la tasa de fotosintética según la concentración de dióxido de carbono sea alta o baja (Taiz & Zeiger, 2007) (García, 2011).

Edificio

La calidad del aire exterior tomado para ventilar el interior del edificio tiene una gran importancia, según la cantidad y concentración de sustancias contaminantes presentes. De acuerdo al Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016) la calidad del aire interior se clasifica como alta, media, moderada o baja según la naturaleza de las fuentes contaminantes y sus efectos sobre la ella. Uno de los métodos para cuantificar la calidad del aire interior es según el nivel de dióxido de carbono. Aunque el dióxido de carbono no debe considerarse un contaminante ya que su concentración dista de los niveles peligrosos para la salud, las recomendaciones para satisfacer las condiciones de bienestar en edificio, oscila entre 500 y 800 ppm - partes por millón (RITE, 2016).

El Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (DB-HS, 2016) exige al edificio medios para ventilar los espacios interiores adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificio, de forma que se aporte un caudal suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes. En los próximos capítulos se estudiarán diversas estrategias de ventilación para alcanzar óptimas condiciones de calidad del aire interior, mediante el diseño de envolventes arquitectónicas vivas.

3.3 De las plantas a la arquitectura

Previamente, en el apartado 3.1.2.3, se ha explicado el proceso biomimético desarrollado en esta investigación. Dicho proceso consiste en la observación de un fenómeno interesante en la naturaleza, las adaptaciones de las plantas a su entorno, y cómo esta percepción desencadena una idea de aplicación, envolventes arquitectónicas vivas con capacidad de adaptación a las condiciones climáticas definidas en su entorno. Los principales pasos a seguir, exploración, abstracción, valoración e implementación, se encadenan de forma lineal para lograr la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. La metodología desarrollada se ordena en tres diferenciados bloques según su contenido: una primera parte relativa a la exploración biológica; una última parte relacionada con el desarrollo arquitectónico; y una parte intermedia, a modo de conexión de las dos anteriores, llamada transición. A continuación se ilustran, mediante un diagrama de flujo (Figura 3.8), las diferentes etapas con sus correspondientes acciones particulares.

Figura 3.8
Diagrama de flujo de las diferentes fases de la metodología propuesta para la generación de diseños conceptuales de envolventes arquitectónicas vivas.

3.4 FASE 1: Biología

3.4.1 Clima

Al iniciar el proceso de exploración, el descubrimiento y selección de los organismos naturales, en este caso las plantas, puede plantear un reto de gran complejidad, por lo que el primer análisis se dirige a entender cómo influye el clima en las plantas, y para ello se recurre a la bioclimatología que es la ciencia que estudia la influencia del clima sobre la distribución de los seres vivos e intenta definir científicamente unos modelos climáticos (Alcaraz, 2013). Por tanto, aunque existen diversas clasificaciones climáticas, según el tipo de variable en el que se fundamentan como la temperatura, la precipitación o mixtas, esta investigación se interesa por aquellas basadas según la distribución de las plantas o bioclimáticas. En bioclimatología, o también denominado fitoclimatología, debe existir una reciprocidad entre el clima, la vegetación y los territorios geográficos, es decir entre los bioclimas, las series de vegetación y las unidades biogeográficas (Rivas-Martínez, 2011).

La fitosociología es la ciencia que trata de las comunidades vegetales, sus relaciones con el medio ambiente y los procesos temporales que las modifican (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Los factores climáticos incluyen la intensidad y periodicidad del calor, la luz, la precipitación, el viento y la humedad relativa, así como la periodicidad y duración de las estaciones. El estudio de todos estos conceptos forma parte del proceso de investigación en el que se analizan las comunidades vegetales, sus relaciones con el medio ambiente y los procesos temporales que las modifican. La base del éxito de las plantas es la capacidad de competir en su medio ambiente. Esta capacidad depende principalmente de su evolución fisiológica y de su adaptación al medio ambiente, por lo que se describe el contexto climático de las plantas seleccionadas. El diseño climático es uno de los mejores enfoques para contribuir a la reducción del consumo de energía en los edificios (Omer, 2008). Por tanto, en la metodología desarrollada, se detallan diversas variables, incluyendo la temperatura, la precipitación y la humedad, como una información particularmente relevante a modo de introducción al análisis biológico así como para la propuesta arquitectónica.

La definición del contexto climático de la especie vegetal es la primera información analizada en el proceso de exploración de la metodología. Aunque en la literatura se encuentran disponibles diversas clasificaciones como las de Köppen (1918, 1931) (KOEPPEN, 2016); Thornthwaite (1931, 1933); Gaussen (1954, 1955); Troll & Paffen (1964); Holdridge (1967); y Walter (1970, 1976) (Walter, 1977) destacadas por ser las más conocidas, esta investigación toma como referencia la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (Worldwide Bioclimatic Classification System), realizada por el Centro de Investigaciones Fitosociológicas y la Universidad Complutense de Madrid, por ser una de las más completas y actuales. Las diferencias entre ésta y el resto, anteriormente citadas, podrían resumirse en la consideración de las montañas como únicas variaciones térmicas latitudinales y no por ello constituyen una sola unidad bioclimática; el reconocimiento de cuatro tipos de bioclimas desérticos entre ellos el mediterráneo desértico y mediterráneo hiperdesértico y por último la consideración de un amplio macrobioclima meditaráneo con una vegetación muy diversa y radicalmente diferente a aquella encontrada en los territorios de bioclimas tropicales con precipitaciones similares (Rivas-Martínez, 2004).

La clasificación bioclimática de Rivas-Martínez se basa en la combinación de diferentes índices bioclimáticos dando como resultado la división del mundo en cinco macroblioclimas: tropical, mediterráneo, templado, boreal y polar. El territorio europeo alberga cuatro de los cinco tipos macro-bioclimáticos: mediterráneo, templado, boreal y polar (Figura 3.9).

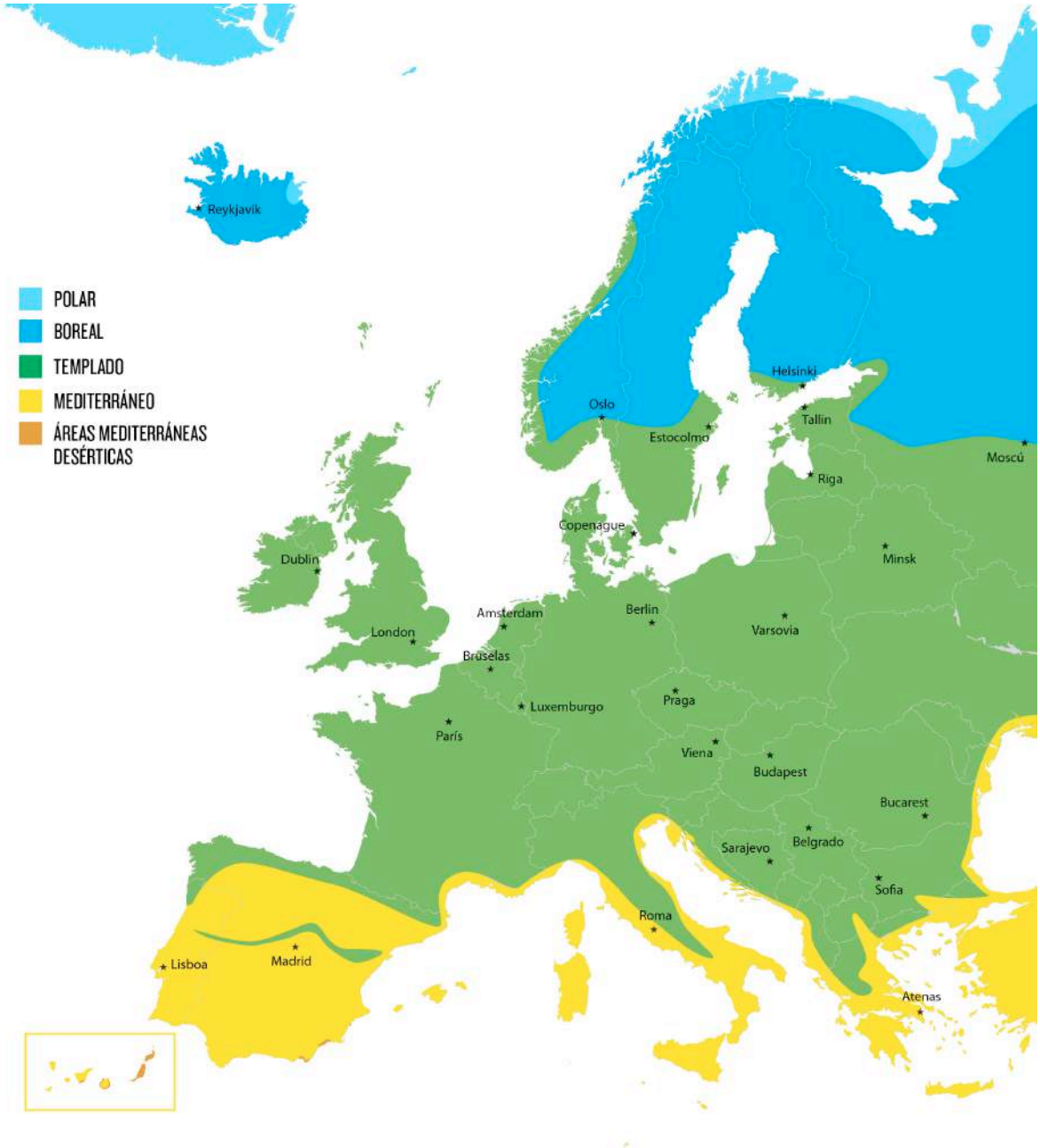


Figura 3.9
Mapa Bioclimático de Europa.
Reelaboración a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017)

Para cada tipo se detallan sus características principales, según los siguientes parámetros:

T: temperatura media anual en grados centígrados.

Ic: índice de continentalidad o intervalo térmico anual. Expresa la amplitud de la oscilación anual de la temperatura (Tmax-Tmin) en grados centígrados.

Los diagramas bioclimáticos o bioclimogramas son gráficas representadas en un sistema de coordenadas cartesianas que usan las escalas de temperatura y precipitación según los diferentes meses del año. Estos diagramas son una herramienta especialmente útil para comparar de un sólo vistazo los climas de las diferentes regiones de toda Europa. En cada capítulo se adjuntan varios diagramas bioclimáticos de estaciones situadas en ciudades de las regiones frías, templadas o cálidas respectivamente. Los diagramas han sido extraídos de la base de datos de la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (Worldwide Bioclimatic Classification System) y registran, entre otros datos, la siguiente información (Figura 3.10):

1: Nombre de la localidad, con las coordenadas de latitud-longitud, y altitud.

2: T: media anual de temperaturas, en grados centígrados.

3: P: media anual de precipitaciones, en mm por metro cuadrado.

4: Tmax: temperatura media de las máximas del mes más cálido, en grados centígrados.

5: Tmin: temperatura media de las mínimas del mes más frío, en grados centígrados.

6: Curva de temperatura (color rojo).

7: Curva de precipitación (color azul).

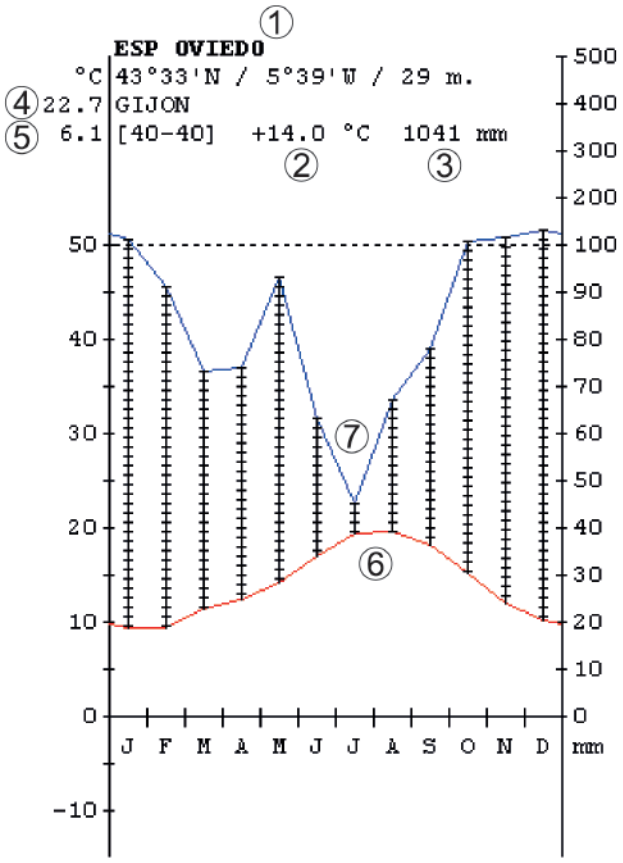


Figura 3.10
Bioclimograma de la ciudad española de Gijón (WBCS, 2017). Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

Una vez fijados los límites de los diferentes tipos bioclimáticos en Europa, el siguiente paso es la definición de los biomas y los principales de grupos de plantas que los ocupan según unas pautas de distribución. La correspondencia para los macrobioclimas definidos en Europa, es decir polar, boreal, templado y mediterráneo, son los biomas tundra; taiga; bosque templado caducifolio; bosque y maquia mediterráneos y formaciones vegetales desérticas. Dado que las estrategias de adaptación de las plantas a los diferentes climas son la base de este estudio se ha considerado apropiado estructurar el trabajo de acuerdo a la clasificación bioclimática y los próximos capítulos se desarrollarán según tres grandes bloques climáticos: fríos, templados y cálidos.

En la figura 3.11 se sintetizan las correspondencias entre la clasificación bioclimática de Rivas-Martínez, sus biomas y los capítulos de la tesis.

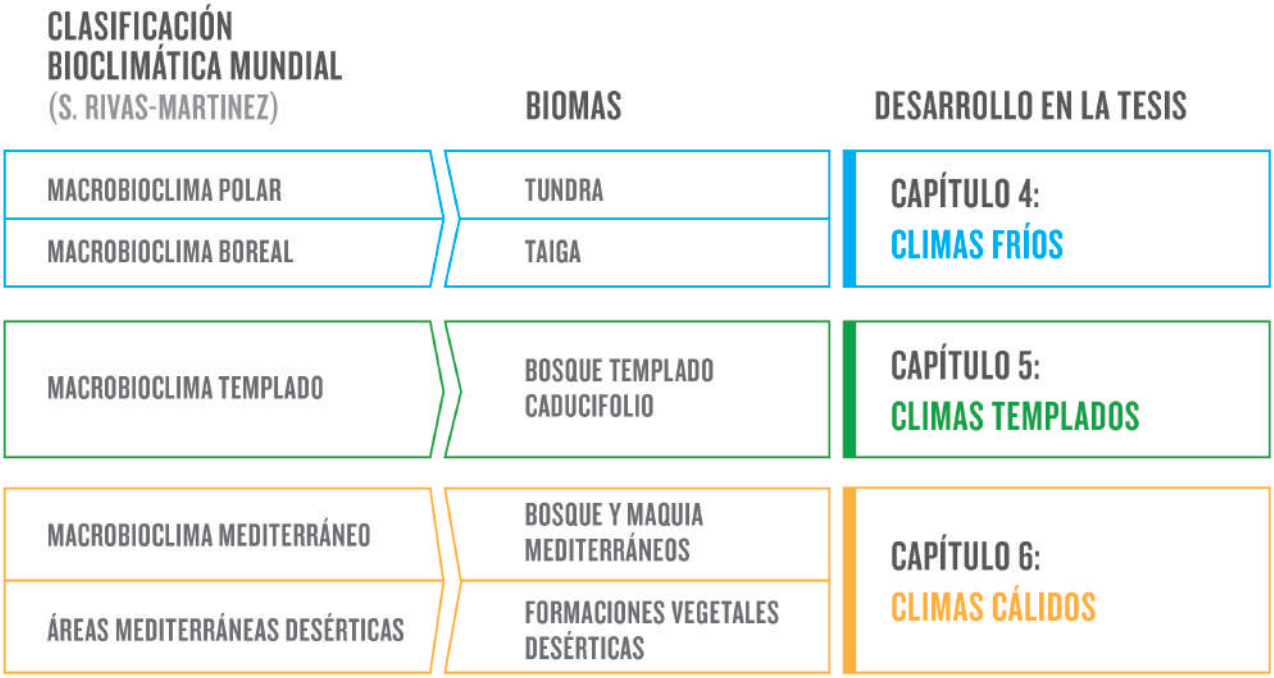


Figura 3.11
Correspondencia entre la clasificación bioclimática de Rivas-Martínez, sus biomas y los capítulos de la tesis.

Para cada zona climática se identificarán las plantas más representativas y se analizarán sus adaptaciones al entorno. El capítulo 4, dedicado a los climas fríos, se corresponde a los macrobioclimas polar y boreal y sus biomas tundra y taiga, representados en Europa en su zona más septentrional a lo largo de una franja costera del Océano Ártico y las costas escandinavas (tundra) y una amplia franja entre los océanos Pacífico y Atlántico, más oceánica hacia Escandinavia (taiga). Este capítulo también recoge los climas de alta montaña, localizados en las altas montañas de todo el mundo.

Diferentes especies de plantas son analizados, para entender sus mecanismos y estrategias como resistencia al frío, el aprovechamiento del sol o la compleja competencia por el agua. El capítulo 5 es el dedicado a los climas templados y se corresponde con el macrobioclima templado y con el bioma bosque templado caducifolio, afectando en Europa al Centro y Oeste, alcanzando el norte de la Península Ibérica. Se seleccionarán diversos mecanismos y estrategias de adaptación de las plantas a la elevada humedad atmosférica o la resistencia a los fríos inviernos entre otros.

Por último, el capítulo 6 dedicado a los climas cálidos estudia el macrobioclima Mediterráneo y las áreas mediterráneas desérticas, y sus biomas bosque y maquia mediterráneos y las formaciones vegetales desérticas. Está representado en Europa por sus límites más meridionales a lo largo de la franja costera del Mediterráneo como entornos de transición entre las regiones templadas y las tropicales a la vez que entre las húmedas y las áridas. Se presentarán diversos ejemplos de mecanismos y estrategias de adaptación de las plantas a los periodos de aridez estival con precipitaciones escasas o amplitudes térmicas importantes.

3.4.2 Exploración de la información biofísica

Necesariamente la fase de exploración es una fase de indagación y recogida de información biofísica. La búsqueda de estos datos de la implica el uso de diversos recursos como libros de fisiología vegetal, destacando la adaptación al medio; artículos científicos, los cuales aportan una detallada información en organismos o sistemas específicos; bases de datos online como por ejemplo las colecciones de AskNature (ASKNATURE, 2016) o del Real Jardín Botánico de Kew (KEW, 2016); y la consulta directa a biólogos, como Tomás E.Díaz, Mª Ángeles F. Casado o también horticultores como Carlos Magdalena, entre otros.

La exploración de la biomecánica y morfología funcional de los grupos de plantas seleccionados en los diferentes biomas se organiza en torno a tres conceptos importantes: desafío, función y estrategia (Figura 3.12), siguiendo las pautas de la Taxonomía Biomimética, la cual organiza la biología según la función (Biomimicry Institute). En la mencionada clasificación, las formas en que los organismos se han adaptado en respuesta a los retos se llaman estrategias, es decir, una estrategia es cómo un organismo hace algo y una función es la razón por la que lo hace (Baumister *et al.,* 2013).

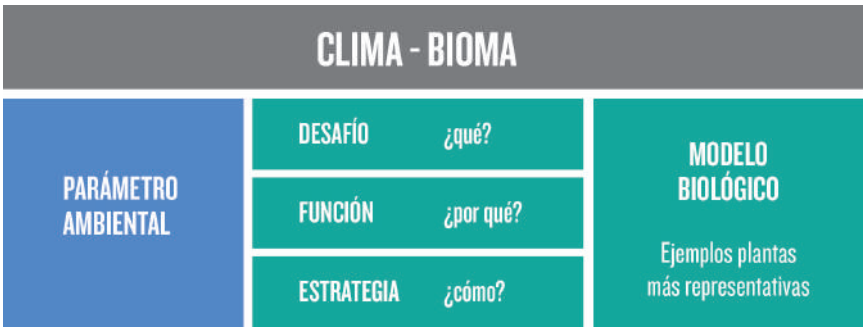


Figura 3.12
Exploración de la información biofísica, siguiendo los criterios de desafío, función y estrategia.

Al comenzar un desafío de diseño, la primera consideración sería preguntarse qué función se quiere resolver, por ello, comprender los conceptos de función y estrategia ayudará a encontrar la información biológica relevante para cada desafío de diseño. A continuación se explica cada uno de ellos:

· **Desafío:** el desafío o reto es el problema que el organismo debe afrontar para sobrevivir dada una situación específica. El desafío sería la respuesta a la pregunta: ¿cuál es la adaptación de la planta estudiada?

Ejemplo: un reto al que se enfrenta una planta del desierto es sobrevivir a las condiciones de calor y sequía, evitando la pérdida de agua y por tanto la deshidratación.

· **Función:** por definición, una función es el propósito de algo. En el contexto biomimético, la función se refiere al papel desempeñado por las adaptaciones de un organismo que le permiten sobrevivir. La función también puede ser "*lo que se necesita que haga la solución de diseño*" (ASKNATURE). La función se identifica con un verbo que define directamente el desafío biológico. La función sería la respuesta a la pregunta: ¿por qué la planta ha necesitado llevar a cabo esta adaptación?

Ejemplo: una función identificada, para evitar la deshidratación, es protegerse frente a la pérdida de agua.

· **Estrategia:** una estrategia biológica es una característica, mecanismo o proceso que desempeña una función en el sistema natural. La estrategia es la forma en la que los organismos se han adaptado como respuesta a los desafíos funcionales para sobrevivir. La estrategia sería la respuesta a la pregunta: ¿cómo ha desarrollado la planta estas funciones específicas?

Ejemplo: una adaptación de protección frente a la pérdida de agua es el recubrimiento de cera en la superficie de las hojas.

A modo de síntesis, una planta en el desierto se enfrenta a unas condiciones extremas de calor y sequía para sobrevivir (DESAFÍO). Para evitar la deshidratación debe protegerse frente a la pérdida de agua (FUNCIÓN), y para ello sus hojas desarrollan como adaptación un recubrimiento de cera (ESTRATEGIA).

La Figura 3.13 representa las funciones identificadas para cada parámetro ambiental, las cuales darán lugar a la estrategias de adaptación desarrolladas por las plantas en los climas fríos, templados o cálidos respectivamente.

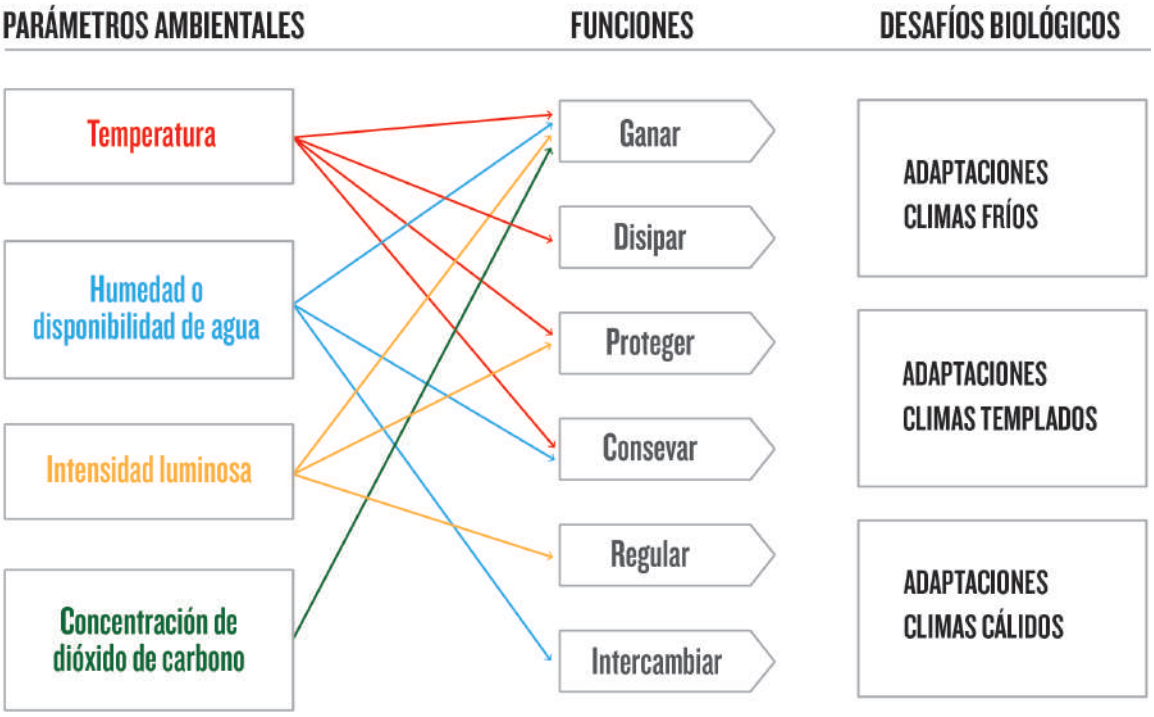


Figura 3.13
Diagrama de funciones identificadas para cada parámetro ambiental que resultarán en las diversas estrategias de adaptación de las plantas en cada clima estudiado.

3.5 FASE 2: Transición

Una vez realizada la exploración de los modelos naturales en los diferentes climas europeos definidos, esta segunda fase de transición, conecta la biología con la arquitectura a través de los procesos de abstracción y valoración, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. Esta segunda fase, Transición, se resumen de forma gráfica en la figura 3.14. A continuación se describen en profundidad las dos etapas que forman esta fase: Abstracción y Valoración.

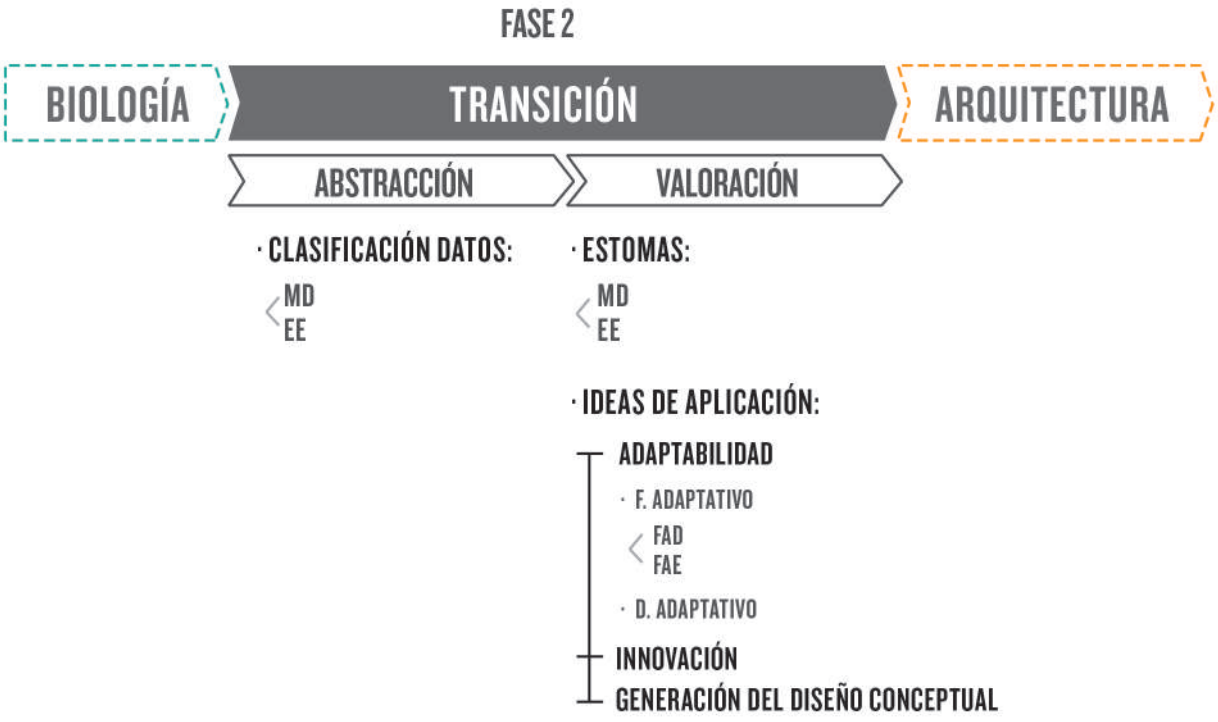


Figura 3.14
Diagrama que ilustra la Fase 2: Transición

3.5.1 Abstracción

Anteriormente, en el capítulo 2, se ha presentado una primera clasificación general de las tres principales adaptaciones de las plantas a su entorno: morfológica, fisiológica y etológica (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Sin embargo, aunque esta clasificación es la considerada universal en términos biológicos, la categorización y organización de la información biofísica obtenida en el proceso de exploración, para poder aplicar soluciones de la naturaleza a soluciones arquitectónicas, supone un reto y por ello se estima oportuno realizar una nueva ordenación de las adaptaciones de las plantas. A través de la creación de una *data collection* o recopilación de datos se organizan los diferentes ejemplos de adaptación considerados de interés en las diferentes áreas climáticas.

La clasificación propuesta ordena los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas a su entorno según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado (Figura 3.15). A partir de ahora, las soluciones de adaptación de las plantas a su entorno se considerarán separadas en mecanismos dinámicos (MD) o estrategias estáticas (EE). A su vez, estos podrían subdividirse según el factor de observación en la escala macro o micro. Por tanto, el sistema de clasificación propuesto organiza los ejemplos biológicos explorados por su adaptación al entorno, según este sistema estructural de adaptación se considere mecanismo dinámico o estrategia estática, en cada tipo de clima y de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

Es importante destacar que esta clasificación se ha realizado con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. Y como parte de la metodología desarrollada, su finalidad es servir como herramienta de utilidad para ingenieros y arquitectos que deseen desarrollar soluciones de envolventes basadas en las estrategias y mecanismos de adaptación de las plantas, seleccionadas por su potencial.

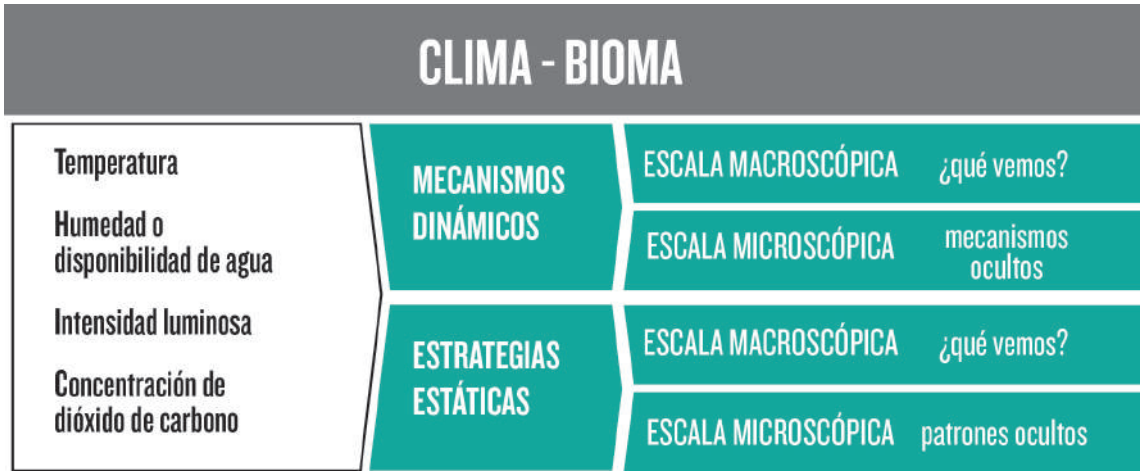


Figura 3.15
Clasificación de datos de los modelos biológicos seleccionados en el proceso de exploración.

Dentro de la categoría mecanismos dinámicos se consideran aquellas plantas que responden a estímulos externos a través del movimiento. La investigación se centra en aquellas plantas que son receptivas, es decir, que exhiben movimientos rápidos y reactivos en una escala de tiempo que podemos percibir, como respuesta a cambios en el medio que las rodea. Se estudian por tanto, cómo las plantas reaccionan de manera específica a la luz, la temperatura, el agua o el dióxido de carbono en las diferentes condiciones climáticas definidas, a través de sus mecanismos dinámicos en las escalas macroscópica y microscópica.

Como ejemplos en la macro escala se podrían citar el caso de las semillas de *Mesembryanthemum* (Figura 3.16) o las hojas de *Rhododendron* (Figura 3.17). El primer caso consiste en el lanzamiento de las semillas a gran distancia, al contacto con las gotas de la primera lluvia, que actúa como disparador verde para lanzarlas desde sus cápsulas y lograr así su dispersión (Attenborough, 1995). El segundo mecanismo dinámico citado es el desarrollado por las hojas de *Rhododendron* y consiste en el enrollamiento foliar bajo condiciones de estrés hídrico y bajas temperaturas (Nilsen, 1991).

Figura 3.16
Mesembryanthemum, como ejemplo de mecanismo dinámico a escala macroscópica. Fuente: Asknature. Disponible en: www.asknature.org

Figura 3.17
Hojas de *Rhododendron,* como ejemplo de mecanismo dinámico a escala macroscópica. Fuente: elaboración propia.

Dentro de la categoría estrategias estáticas se consideran las propiedades multifuncionales de las hojas de las plantas. Las superficies de las hojas proporcionan más de una solución de adaptación a las condiciones ambientales incluyendo, por ejemplo, superficies reflectantes de la luz solar o superficies con propiedades de superhidrofobia o superhidrofilia (Koch *et al.,* 2009) (Bhushan, 2009) (Gibson, 2012). Los casos de las plantas *Fenestraria rhopalophylla* (Figura 3.18) y *Cerastium tomentosum* (Figura 3.19) son dos ejemplos de estrategias estáticas en la escala macroscópica, con diferentes soluciones soluciones de adaptación a medios excesivamente cálidos y secos. La primera estrategia se basa en la filtración de la luz solar dentro de la planta a través de un tallo interno transparente. La segunda consiste en la protección de la planta de la luz solar directa y evitar así la evaporación y pérdida de agua excesiva, a través de superficies peludas. Como ejemplo de estrategia estática en la escala microscópica se podría citar la hoja de la planta *Colocasia esculenta* (Figura 3.20) con propiedades superhidrófobas también conocidas popularmente como el efecto Lotus, que a través de la rugosidad de la superficie proporciona repelencia al agua y al mismo tiempo reduce la adhesión de partículas contaminantes, lo cual ofrece numerosas aplicaciones tecnológicas (Barthlott & Neinhuis, 1997).

Figura 3.18
Fenestraria rhopalophylla, como ejemplo de estrategia estática a escala macroscópica. Fuente: elaboración propia.

Figura 3.19
Cerastium tomentosum, como ejemplo de estrategia estática a escala macroscópica. Fuente: elaboración propia.

Figura 3.20
Colocasia esculenta, como ejemplo de estrategia estática a escala microscópica. Fuente: elaboración propia.

3.5.2 Valoración

3.5.2.1 Estomas

Una vez categorizados diversos ejemplos de adaptación de las hojas de las plantas para una posible aplicación a envolventes arquitectónicas, se han seleccionado los estomas como estructuras de especial interés. Los estomas son poros que se encuentran en la epidermis de las hojas y sirven para controlar el intercambio gaseoso, proporcionando a la planta una herramienta fundamental para adaptarse a un ambiente en continuo cambio. Estos poros están bordeados por un par de células especializadas conocidas como células oclusivas o de guarda que perciben y procesan los diferentes estímulos ambientales para desencadenar respuestas celulares que resultan en la apertura o el cierre estomático (Azcón-Bieto & Talón, 2000) (Vogel, 2012). Se han seleccionado los estomas debido a que existen en todas las plantas terrestres y son una herramienta experimental clave para investigar cómo las plantas responden a los factores ambientales. Además, los estomas son un ejemplo de mecanismos dinámicos y, al mismo tiempo, de estrategias estáticas, demostrando así que la clasificación propuesta no es exclusiva. Por lo tanto, los estomas son estructuras con un valor excepcional en el proceso de inspiración biomimética.

3.5.2.2 Estomas como mecanismos dinámicos

Por un lado, los estomas son considerados mecanismos dinámicos (MD) debido a sus movimientos de válvula en respuesta a los intercambios de agua y dióxido de carbono. Las principales funciones de los estomas incluyen la regulación de la pérdida de agua, esto es la transpiración, y la absorción del dióxido de carbono. Los movimientos estomáticos se producen como respuesta a una disminución en la concentración de dióxido de carbono, así como respuesta directa a la luz. La temperatura proporciona otro estímulo, pues comúnmente los estomas se abren respondiendo al aumento de la temperatura. Finalmente los estomas también reaccionan con el agua ya que niveles de humedad elevados provocan el aumento de la turgencia en las células oclusivas lo que hace que los estomas se abran (Martin *et al.,* 1983) (Koch *et al.,*2009). Aunque en los siguientes capítulos se desarrollarán en profundidad todos estos mecanismos, la figura 3.21 esquematiza el funcionamiento de los movimientos estomáticos dependiendo de diferentes variables controladas desde dentro de la hoja, como la concentración de dióxido de carbono o el nivel de agua, ó de los cambios en los parámetros externos humedad, temperatura, dióxido de carbono y luz.

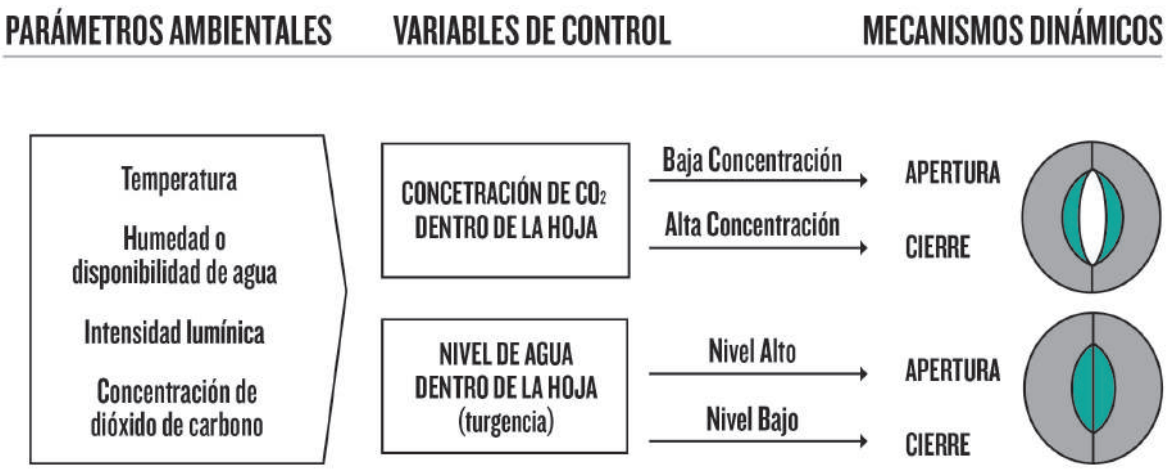


Figura 3.21
Diagrama de los estomas considerados como mecanismos dinámicos.

3.5.2.3 Estomas como estrategias estáticas

Por otro lado, los estomas son considerados estrategias estáticas (EE) debido a la gran variedad de morfologías en la superficie foliar alrededor de los poros estomáticos, como consecuencia directa de las adaptaciones funcionales a las condiciones ambientales. De acuerdo con los diferentes desafíos a los que se enfrentan las plantas según las diferentes zonas climáticas, las hojas han desarrollado diferentes morfologías estomáticas y en esta investigación son valoradas como la clave de sus adaptaciones al medio. Es preciso aclarar la importancia del entendimiento de dichos principios biológicos como respuestas de adaptación para poder transferirlos a sistemas artificiales para envolventes arquitectónicos en lugar de simplemente copiarlos. La información estudiada en relación a la morfología se organiza según los conceptos de patrones estomáticos y estrategias anatómicas (Figura 3.22).

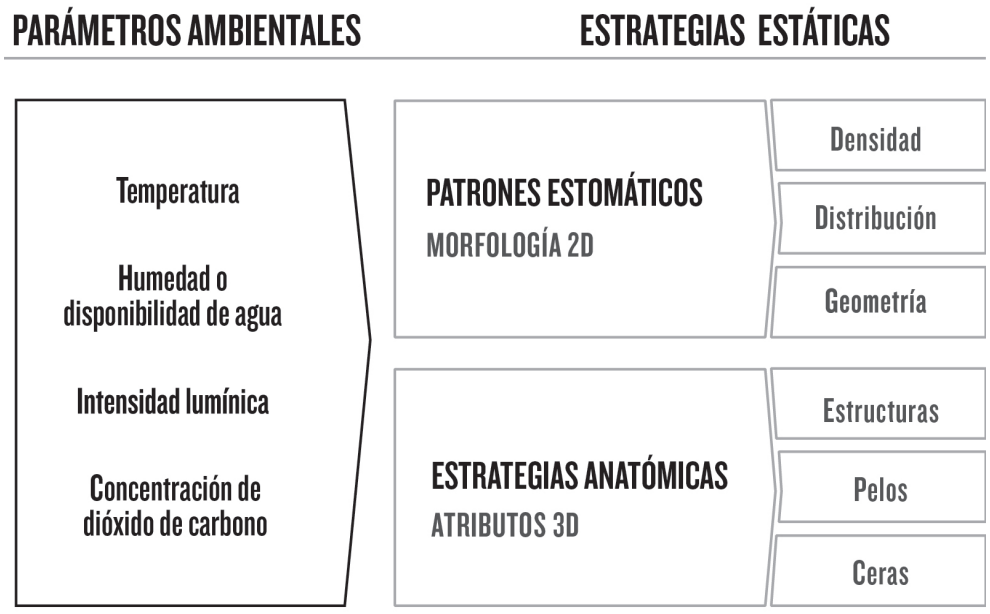


Figura 3.22
Diagrama de los estomas considerados como estrategias estáticas.

A continuación se detallan los conceptos de patrones estomáticos y estrategias anatómicas :

- **Patrones estomáticos:** son aquellos rasgos que definen la morfología en dos dimensiones del estoma. Los estomas desempeñan un papel vital en el mantenimiento de la homeostasis de la planta y de ahí la importancia de conocer su forma, número o distribución en la superficie foliar (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Para el análisis de los patrones estomáticos se seleccionan los siguientes tres parámetros:

  (1) Densidad: la densidad estomática, también llamada frecuencia estomática, corresponde al número de estomas por unidad de superficie foliar (Willmer & Fricker, 1996) (Croxdale, 2000). El índice estomático representa el cociente entre el número de estomas y la cantidad de células epidérmicas (Willmer & Fricker, 1996) (Croxdale, 2000), y es un valor que puede variar según el ambiente ecológico, el cual puede ejercer cierta influencia sobre este carácter (Perés-Martínez *et al.*, 2004). Conocer el número e índice estomático, es importante, ya que se ha demostrado que la máxima conductancia estomática de vapor de agua, está determinada por el tamaño y densidad de estomas (Taylor *et al.*, 2012). Diversos estudios (Rubino *et al.*, 1989) (Bethke & Drew, 1992) (Salas *et al.*, 2001) demuestran que tanto la densidad estomática como el índice estomático son variables que están fuertemente influenciadas por la especie vegetal así como por condiciones ambientales, convirtiendo a estos parámetros en características relevantes en la adaptación de la planta al entorno. Para calcular el índice estomático (IE) se usa la siguiente fórmula sugerida por Wilkinson (1979):

  $$IE = \frac{NE}{NE + CE} \times 100$$

  donde IE: índice estomático.

  NE: número de estomas por campo de observación

  CE: número de células epidérmicas típicas en el campo de observación.

  (2) Distribución: la posición de los estomas en las superficies foliares es variable. Se considera que es más frecuente encontrar los estomas en la parte abaxial o el envés de las hojas (Sánchez & Aguirreola, 1996), aún siendo la distribución estomática un parámetro variable y dependiente de cada especie. La cantidad de estomas en la superficie adaxial (haz) en comparación con la abaxial (envés) es característica distintiva de diferentes especies. Existe una relación entre los parámetros ambientales humedad, luz y dióxido de carbono, y la distribución estomática en las superficies foliares (Kakami *et al.*, 2003). Además de la posición de los estomas en el haz o el envés de la hoja, se valora la percepción de un patrón de distribución, ya sea ordenado o aleatorio (Croxdale, 2000). A lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 se presentarán diversos ejemplos de adaptación a través de la distribución estomática, y se estudia si las características morfológicas de los estomas han respondido de manera diferencial a las condiciones ambientales, pudiendo extraer alguna pauta o regla para la generación de patrones de diseño de envolventes.

(3) Geometría: la morfología de los estomas influye en el control de la pérdida de agua (Toral *et al.*, 2010), y por lo tanto en el proceso de adaptación a las condiciones climáticas de cada región. A lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 se analizarán las características geométricas de los estomas, a través del estudio de su tamaño, según mediciones de su longitud y ancho, observando sus proporciones. El valor medio se obtiene de cinco mediciones observadas en un área de 0,0736 mm^2.

- **Estrategias anatómicas:** describen atributos tridimensionales como estructuras, pelos o ceras cuyas funciones van desde reducir la evaporación de agua o reflejar la luz como mecanismo de control de la temperatura (Willmer & Fricker, 1996).

3.5.2.4 Ideas de aplicación

En la fase de transición, el proceso de valoración trata de seleccionar ideas con potencial de aplicación al desarrollo de envolventes arquitectónicas. La Figura 3.23 sintetiza los pasos a seguir durante este proceso de valoración, cuyo objetivo es la generación de diseños conceptuales como fase de diseño preliminar, con la estimación de las posibles ideas de aplicación y la innovación aportada.

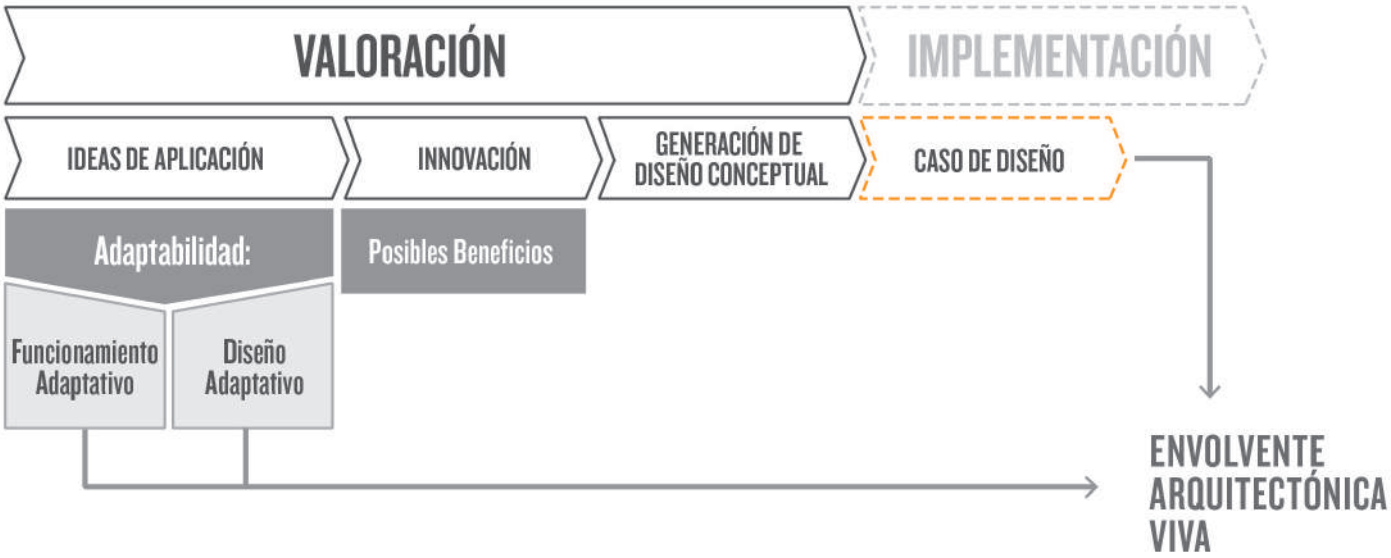


Figura 3.23
Diagrama del proceso de valoración.

Adaptabilidad

Para valorar las posibles ideas de aplicación que sugieren las adaptaciones de las plantas, se describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes en cada clima, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

Al igual que se hizo en la Fase 1-Biología, se identifican una serie de funciones las cuales darán lugar a la estrategias de adaptación desarrolladas por las envolventes en cada zona climática (Figura 3.24).

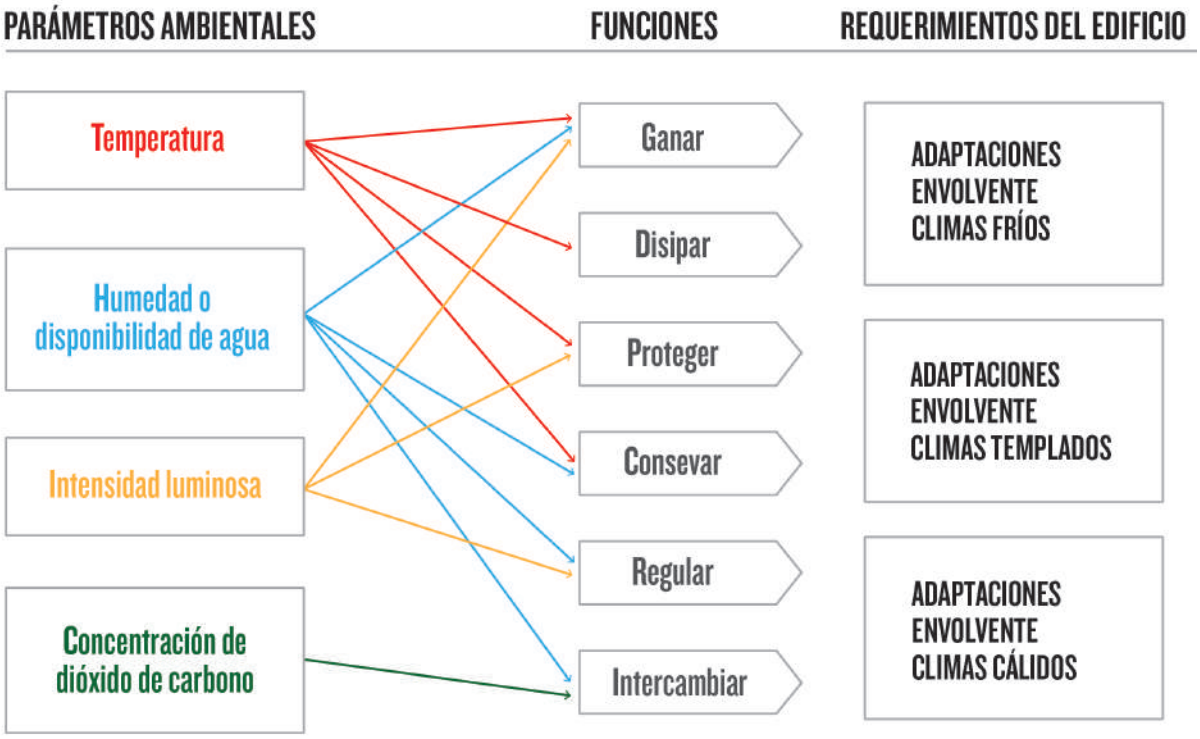


Figura 3.24
Diagrama de las funciones según los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de cada zona climática, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

Las ideas de aplicación sugieren un nuevo tipo de adaptabilidad. La envolvente alcanzará la adaptabilidad a las condiciones climáticas de cada zona mediante estrategias que le permitan hacer frente a los desafíos definidos. La adaptabilidad en las envolventes arquitectónicas se implementa a través de un tipo de funcionamiento y un diseño adaptativos. A continuación se describe el funcionamineto adaptativo (FA) y el diseño adaptativo (DA):

- **Funcionamiento adaptativo (FA):** este tipo de adaptabilidad se desarrolla en las envolventes a través de su tectónica, como reacción ante los estímulos exteriores que la solicitan. El funcionamiento adaptativo queda definido en las envolventes arquitectónicas a través de diversos procesos clave. Para la identificación de las procesos se han tenido en cuenta las demandas de los usuarios dentro del edificio, tomando como referencia los reglamentos estándar citados anteriormente (CTE) (ASHRAE), según el tipo y nivel de actividad. Además de estas normativas, los procesos definidos se ordenan de acuerdo a las funciones descritas previamente, según los parámetros ambientales humedad, temperatura, luz y dióxido de carbono. Las funciones y procesos resultantes se enumeran a continuación y se resumen de forma gráfica en la figura 3.25.

- Funciones reguladoras de la temperatura (FT):
  - Ganar temperatura. Procesos: Captar. Absorber.
  - Conservar la temperatura. Procesos: Almacenar.
  - Disipar temperatura. Procesos: Refrigerar.

- Funciones reguladoras de la humedad (FH):
  - Ganar humedad. Procesos: Captar. Recoger. Absorber.
  - Regular el nivel de humedad. Procesos: Almacenar. Ventilar.

- Funciones reguladoras de la luz (FL):
  - Ganar radiación solar. Procesos: Captar. Absorber.
  - Proteger de la radiación solar. Procesos: Filtrar. Reflejar.
  - Regular la intensidad luminosa. Proceso: Difuminar.

- Funciones reguladoras del dióxido de carbono (FG):
  - Intercambiar aire. Proceso: Ventilar.

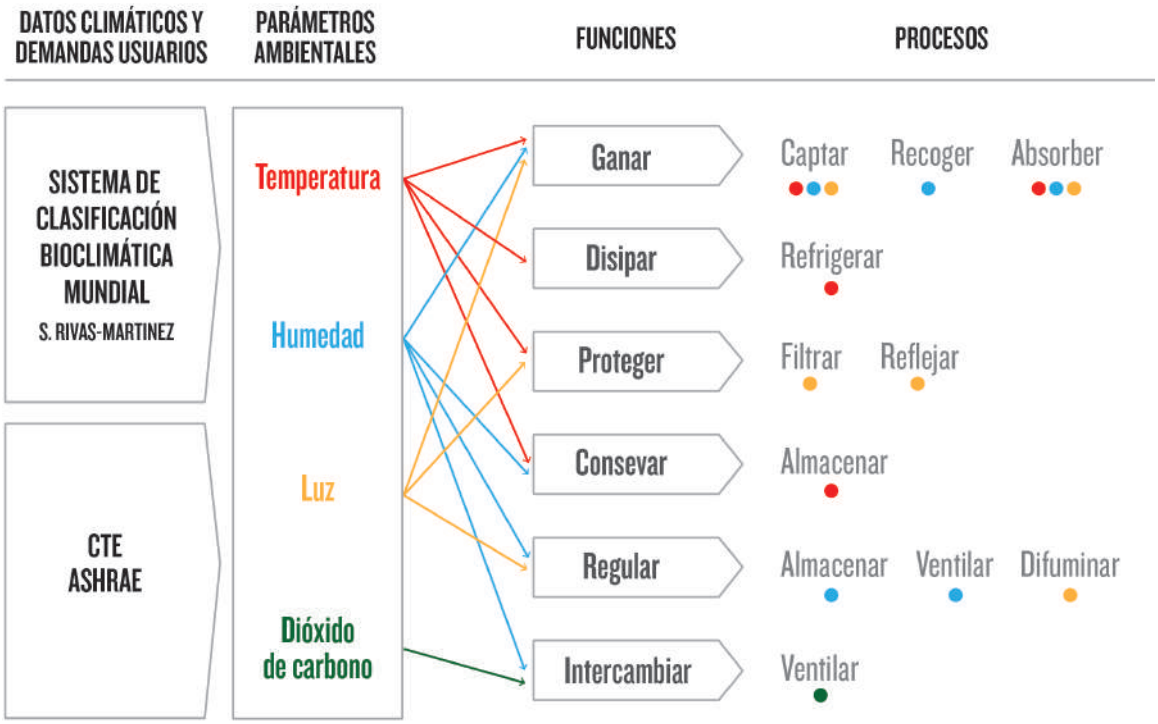


Figura 3.25
Diagrama de las funciones y procesos identificados en la envolvente arquitectónica viva.

Del mismo modo que las adaptaciones de las plantas están organizadas en dos grupos, MD y EE, las funciones y procesos identificados en la envolvente también se agrupan según dos categorías de adaptabilidad: dinámica o estática. Los dos tipos de funcionamiento adaptativo se enumeran a continuación y se resumen de forma gráfica en la figura 3.26.

(1) Funcionamiento adaptativo de tipo dinámico (FAD): en el que se observa cierto tipo de movimiento, como por ejemplo las acciones de plegar, deslizar, expandir, doblar, articular, inflar, ventilar, rotar, enrollar o curvar, lo que da lugar a cambios en la configuración de la envolvente por medio de partes móviles.

(2) Funcionamiento adaptativo de tipo estático (FAE): en el que los cambios no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento, afectando los cambios directamente a la estructura interna del material y sus propiedades específicas como la capacidad de reflexión, absorción, disipación o conservación de los diferentes parámetros ambientales como diversas formas de intercambio de energía.

· **Diseño adaptativo (DA):** en este caso la adaptabilidad se manifiesta a través de las características morfológicas en las envolventes arquitectónicas. Se trata de definir una serie de criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño de la envolvente, como disposiciones y configuraciones, más que formas finales o fórmulas predeterminadas.

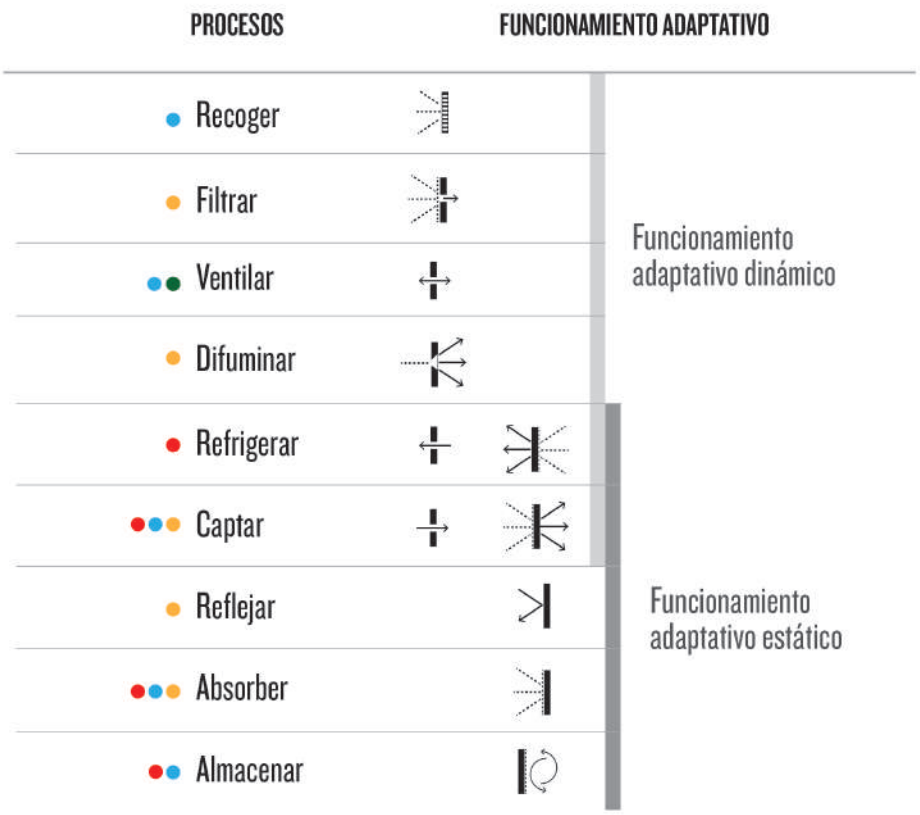


Figura 3.26
Diagrama de los dos tipos de funcionamiento adaptativo identificados en la envolvente arquitectónica viva.

3.5.2.5 Innovación

El concepto de innovación intenta mostrar el posible beneficio o las ventajas de la metodología de diseño biomimético, en el diseño de nuevas envolventes arquitectónicas o en aplicaciones de rehabilitación, en comparación con los sistemas de construcción estándar según criterios de eficiencia energética. Para cada zona climática, se hace una breve exposición de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en dichos climas templados. Los inconvenientes observados en los sistemas empleados comúnmente en las envolventes de los edificios sugieren un nuevo tipo de adaptabilidad. A través de los criterios de diseño de envolventes se puede reducir la demanda de energía en los sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación o iluminación (Pacheco *et al.,* 2012), y por tanto, dar solución a los problemas de eficiencia energética a través de soluciones innovadoras (Omrany *et al.,*2016). Por ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas. Los principios biológicos derivados de las adaptaciones de las plantas a su entorno pueden mejorar la innovación, y algunas ideas son propuestas en función de los retos y posibles beneficios del nuevo diseño.

3.5.2.6 Generación de diseños conceptuales

La generación de diseños conceptuales es el último paso en el proceso de valoración, y es el paso previo a la implementación técnica. El diseño conceptual ejerce de conexión entre la síntesis obtenida tras la exploración de la información biológica y el desarrollo de un caso de estudio de envolvente. El diseño conceptual pone en valor toda la información biológica estudiada, sus posibles ideas de aplicación para el desarrollo de sistemas constructivos teniendo en cuenta los retos de diseño en los edificios y los posibles beneficios a obtener. La generación de diseños conceptuales no es una traducción directa de las adaptaciones de las plantas, sino que es un proceso de emulación inspirado en el estudio de su morfología, estructura y mecanismos de funcionamiento.

La generación de diseños conceptuales se aborda desde las funciones que la envolvente tiene que desarrollar para hacer frente a los desafíos de cada clima. En cada zona climática se definen una serie de funciones, y para cada una de ellas se presenta uno o más procesos arquitectónicos a desarrollar por la envolvente. Para los procesos arquitectónicos expuestos se proponen diversos procesos biológicos de adaptación. Se presenta una matriz de diseño que relaciona los procesos arquitectónicos con los procesos biológicos, de forma gráfica. La matriz resultante propone una serie de mecanismos dinámicos y estrategias estáticas como posibles soluciones de aplicación al diseño de envolventes. Una vez expuesta la matriz de diseño, surgen formas innovadoras como exposición de posibles implementaciones técnicas, a través del esbozo de dibujos preeliminares.

La generación de diseños conceptuales debe considerar el aspecto del confort del usuario además de sus necesidades fisiológicas. Es importante señalar que el confort humano es un aspecto fundamental a tener en cuenta durante este proceso, y que el diseño de la envolvente dispondrá de las características necesarias para evitar conflictos entre diferentes requerimientos, proporcionando un rendimiento óptimo. Como ejemplo de esto citar que las estrategias empleadas como sistemas de sombreado pueden llegar a interferir en el equilibrio del confort interior, no sólo en lo relativo a las demandas térmicas, sino también en lo que implica visualmente (Fiorito *et al.,* 2015).

Por lo tanto, durante la etapa de generación de diseños conceptuales se deberán tener en cuenta los factores necesarios para lograr la satisfacción de ocupación además de aquellos relacionados con el rendimiento energético.

3.6 FASE 3: Arquitectura

Una vez desarrolladas las etapas de exploración, abstracción y valoración, la implementación técnica concluye la metodología "De las plantas a la arquitectura". La implementación técnica consiste en el desarrollo de los diseños conceptuales seleccionados previamente en forma de casos de diseño, su prototipado, la fabricación de los elementos a escala mediante la aplicación de tecnologías avanzadas, la validación del sistema y la evaluación de los resultados, mediante técnicas de medición ya establecidas en la industria. En esta última etapa, la de implementación técnica, la investigación presentada alcanza a desarrollar tres casos de diseño, de forma conceptual, y diferentes experimentos materiales. La evaluación de los casos de diseño propuestos para su posible fabricación a escala real y su posterior medición y evaluación se prevén como desarrollos futuros derivados del trabajo realizado en esta linea de investigación.

En los siguientes capítulos se desarrollará un caso de diseño teórico para cada zona climática, haciendo un total de tres casos de diseño. Los casos de diseño abren nuevas perspectivas para soluciones técnicas diferentes para envolventes arquitectónicas vivas y muestran el potencial de llevar a cabo un nuevo tipo de innovación bioinspirada para lograr la eficiencia energética. El caso de diseño resulta de la selección, en la matriz de diseño propuesta para cada zona climática, de diversos mecanismos dinámicos y estrategias estáticas como características dominantes que proporcionan las pautas para la generación del diseño conceptual. El siguiente paso es la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. La traducción gráfica abstracta incorpora la adaptabilidad de la envolvente por medio del funcionamiento adaptativo y del diseño adaptativo (Figura 3.27).

Figura 3.27
Diagrama de la adaptabilidad en la envolvente.

El funcionamiento adaptativo de la envolvente se desarrolla por medio de un funcionamiento adaptativo de tipo dinámico (FAD) y un funcionamiento adaptativo de tipo estático (FAE), a través de los materiales activos. El diseño adaptativo se aplica en la envolvente a través de la definición de patrones. En los siguientes apartados se explican los conceptos de materiales activos y patrones.

3.6.1 Materiales activos

Una vez definidas las funciones requeridas en la envolvente, la siguiente cuestión por resolver sería la materialización de todos estos mecanismos en implementaciones técnicas. En la parte final de esta investigación se estudian las posibilidades de fabricación de sistemas sensibles, en los que múltiples materiales pueden reaccionar al medio y deformarse con el paso del tiempo, dependiendo de los diferentes estímulos ambientales. Esto solo será posible a través de los materiales activos.

Hasta ahora, los materiales tradicionales como la cerámica, el metal o el vidrio se fabrican industrialmente para satisfacer las demandas del sector de la construcción, por lo que son homogéneos y de composición uniforme, e isotrópicos, con propiedades idénticas o muy similares en todas las direcciones (Menges, 2012). Estos materiales convencionales y sus procesos de fabricación proporcionan soluciones inertes, resultados estáticos o equipos de compleja tecnología para lograr sistemas cinéticos, lo que sugiere la dificultad para lograr funcionamientos adaptativos por medio de materiales tradicionales inertes. Algunos intentos de arquitectura cinética se desarrollan a través de sensores mecánicos y electrónicos, actuando y regulando dispositivos, resultando en una adaptación alcanzada por medio de dispositivos que consumen energía eléctrica y por tanto use trata de arquitectura no eficiente en términos de energía, como es el caso del Instituto Árabe de París analizado en el capítulo 2.

A diferencia de los materiales tradicionales, los materiales inteligentes tienen propiedades que reaccionan a los cambios en su entorno. En los últimos años ha surgido una amplia gama de materiales inteligentes, como las aleaciones con memoria de forma (SMA), los polímeros con memoria de forma (SMP), los materiales piezoeléctricos, los materiales magnetostrictivos, los materiales electrostrictivos o los polímeros electroactivos (Addington & Schodek, 2004). Normalmente, la mayoría de los materiales inteligentes dependen de un estímulo eléctrico para activar el movimiento. Existen diversas clasificaciones de los diferentes tipos de materiales inteligentes, por ejemplo la realizada por Addington (Addington & Schodek, 2004) que describe dos tipos de materiales inteligentes: los materiales con cambio de propiedades y materiales de intercambio de energía. Los primeros actúan mediante el cambio de alguna de sus propiedades química, mecánica, óptica, eléctrica, magnética o térmica, en respuesta a un cambio en las condiciones de su entorno, sin necesidad de un control externo. Los segundos transforman la energía de una forma a otra para lograr un estado final deseado, como por ejemplo los materiales fotovoltáicos que transforman la radiación solar en potencial eléctrico (Addington & Schodek, 2004). Por otro lado, en algunos centros de investigación como Materfad en Barcelona (MATERFAD, 2016) o Institute of Making en Londres (INSTITUTE OF MAKING, 2016), la información relacionada con los materiales inteligentes se organiza directamente en función de las propiedades y características, como la fotoluminiscencia, el electrocromismo, la memoria de forma, el cambio de fase o magnetoreología, entre otros.

Sin embargo, este tipo de materiales inteligentes han sido descartados en el proceso de selección, pues la tesis presentada sólo se centra en sistemas adaptativos de baja tecnología y baja coste energético, en lugar de sistemas altamente automatizados y mecanizados. Resultan de especial interés aquellos materiales que tienen propiedades estructurales y físicas con capacidad de generar movimiento o adaptarse cinéticamente, en tiempo real, a los cambios producidos en el ambiente. En este trabajo se examinan materiales activos con comportamientos dinámicos para lograr un mejor rendimiento en la adaptabilidad; materiales que se encogen, se pliegan, se expanden, se enrollan o cambian de color, respondiendo a los cambios pero que al mismo tiempo permanecen estables en sus diferentes configuraciones. Se buscan materiales receptivos y automáticos, con características inherentes, cuyo comportamiento performativo y capacidad de cambio reversible le permita reaccionar ante las condiciones ambientales cambiantes que actúan como desencadenantes o disparadores naturales.

Los conos de coníferas podrían ser un buen ejemplo de la definición expuesta de material activo, pues tienen ciclos de apertura y cierre repetitivos como capacidad de respuesta frente a los cambios de humedad. Los conos de coníferas suponen un ejemplo biológico perfecto de sistema reactivo a la humedad, cuya capacidad de respuesta se encuentra en la estructura interna del propio material debido a sus propiedades de higroscopicidad y anisotropía.

La gráfica de la figura 3.28 muestra los experimentos realizados en un cono de conífera, mostrando su capacidad de reacción frente a los cambios de humedad relativa en el ambiente mediante un movimiento constante y cíclico de apertura y cierre.

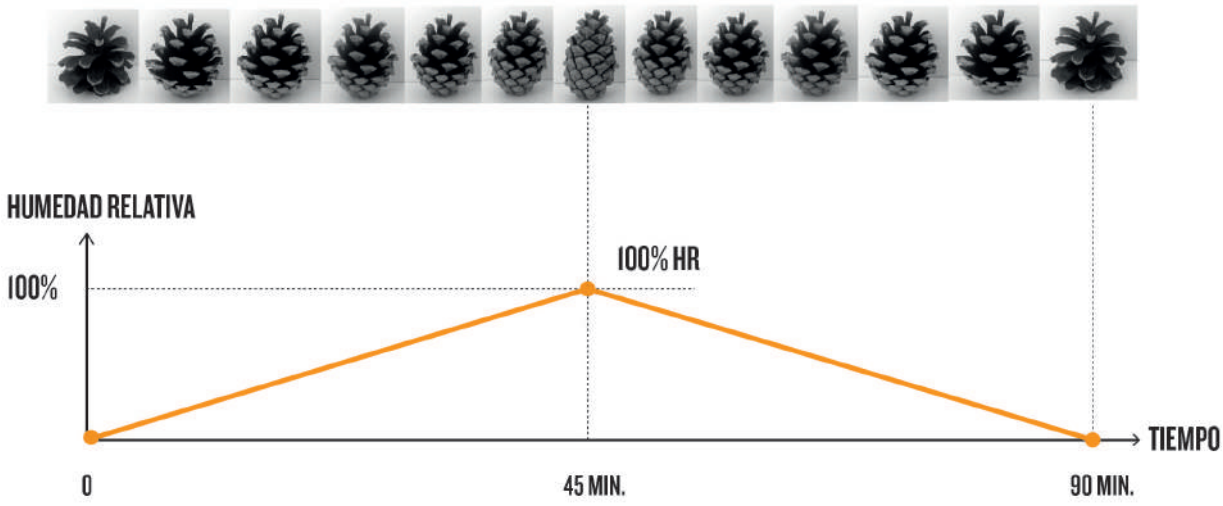


Figura 3.28
Gráfica de los movimientos, reactivos a la humedad, registrados en un cono de conífera.

Por tanto esta investigación trata de encontrar la materialización de un sistema capaz de reaccionar y adaptarse a los diferentes aspectos ambientales cambiantes, a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material, sin necesidad de estímulos eléctricos o elementos mecánicos complejos. La búsqueda de los materiales activos se subdivide en aquellos en los que se observan cierto tipo de movimiento y aquellos en los que los cambios no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento. Se llamarán materiales activos dinámicos y materiales activos estáticos, respectivamente.

Una lista de posibles materiales activos es presentada en la figura 3.29, según los parámetros ambientales y las diversas funciones definidas para la envolvente arquitectónica.

MATERIALES ACTIVOS DINÁMICOS

FILTRAR	
Dióxido de carbono	polímero reactivo CO_2
INTERCAMBIAR	
Humedad	madera / corcho / hidrogel
Dióxido de carbono	?
DIFUMINAR	
Luz	textil polímero reactivo
DISIPAR	
Humedad	madera / corcho / hidrogel
Temperatura	polímero termo-expansivo termo-bimetal memoria de forma
Dióxido de carbono	?
GANAR	
Temperatura	polímero termo-expansivo termo-bimetal memoria de forma

MATERIALES ACTIVOS ESTÁTICOS

DISIPAR	
Humedad	hidrogel
Temperatura	cambio de fase (PCM)
Dióxido de carbono	?
GANAR	
Temperatura	cambio de fase (PCM)
REFLEJAR	
Temperatura	polímero termocrómico
Luz	polímero fotocrómico tintas fotocrómicas
ABSORBER	
Humedad	hidrogel
Temperatura	polímero termocrómico cambio de fase (PCM)
Luz	polímero fotocrómico tintas fotocrómicas
CONSERVAR	
Temperatura	cambio de fase (PCM)

Figura 3.29

Diagrama de una primera aproximación en la búsqueda de materiales activos.

3.6.1.1 Materiales activos dinámicos

Materiales en los que cierto tipo de movimiento es observable a simple vista, a través de configuraciones que les permiten plegarse, deslizarse, expandirse, doblarse, articularse, inflarse, rotar, enrollarse o curvarse. El uso de este tipo de materiales dará lugar a cambios en la configuración de la envolvente por medio de sistemas capaces de aumentar o disminuir en tamaño, o cambiar de forma, a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material. Los materiales activos dinámicos son los que implementarán el tipo de funcionamiento adaptativo dinámico definido previamente. En esta categoría se han seleccionado materiales reactivos a la temperatura, como las láminas termo-bimetálicas o lo que es lo mismo dos metales unidos con diferente coeficiente de dilatación que, cuando se calientan, el conjunto se deforma y la estructura que forman se dobla; o polímeros termo-expansivos cuya expansión es inducida por cambios térmicos.

También se destacan materiales reactivos a la humedad como la madera, que debido a sus propiedades de higroscopicidad y anisotropía están respondiendo continuamente a cambios en la humedad relativa, dando como resultado un movimiento dimensional constante; o el hidrogel que se hincha cuando absorbe agua aumentando considerablemente su volumen pero manteniendo su forma.

3.6.1.2 Materiales activos estáticos

Materiales en los que los cambios no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento, afectando directamente a la estructura interna del material y sus propiedades específicas como la capacidad de reflexión, absorción, disipación o conservación de los diferentes parámetros ambientales como diversas formas de intercambio de energía. Los materiales activos estáticos son los que implementarán el tipo de funcionamiento adaptativo estático definido previamente. En esta categoría se han seleccionado materiales reactivos a la temperatura, como polímeros termocrómicos, ya que el termocromismo es la propiedad para cambiar de color debido a un cambio de temperatura; o materiales de cambio de fase, capaces de absorber, almacenar y disipar calor. También se destacan algunos materiales reactivos a la luz como los materiales fotocrómicos o a la humedad como hidrogeles.

3.6.1.3 Experimentos con materiales activos

Para cada caso de diseño desarrollado se presentará algún experimento con materiales activos que se han llevado a cabo utilizando tecnologías de impresión 3D.

En los últimos años, se ha probado el enorme potencial de la fabricación aditiva y las tecnologías de impresión tridimensionales para generar sistemas activos y estructuras con geometrías complejas. Las tecnologías de impresión se han desarrollado con una precisión y velocidad excepcional (Raviv *et al.,* 2014) proporcionando ciertas ventajas, como la inmediatez, la precisión material o el bajo costo de fabricación, respecto a otros sistemas de prototipado. Recientemente, algunos grupos de investigación de todo el mundo han ido un paso más allá y han comenzado a trabajar en torno al concepto de impresión en cuatro dimensiones, permitiendo a los materiales autoensamblarse en estructuras 3D, agregando la dimensión adicional del tiempo. Algunos equipos, como los de

Skylar Tibbits en el Centro de Diseño Internacional del MIT, o H. Jerry Qi y Martin L. Dunn en el Laboratorio de Fabricación Avanzada de la Universidad de Tecnología y Diseño de Singapur, desarrollan y prueban métodos de impresión 4D, centrándose en el autoensamblaje y tecnologías de materiales programables (Tibbits, 2014) (Ge *et al.,* 2013). El autoensamblaje es un proceso mediante el cual las partes desordenadas construyen una estructura ordenada a través de la interacción local, tratándose de un fenómeno independiente de la escala de aplicación (Tibbits *et al.,* 2014) (Raviv *et al.* 2014). El proceso de autoensamblaje se ejecuta mediante el uso de fibras activas que son incorporadas en los materiales compuestos para que su comportamiento pueda ser controlado de manera predecible cuando el objeto está sometido a fuerzas térmicas y mecánicas (Ryu *et al.,* 2012) (Ge *et al.,* 2014)(Ge *et al.,* 2016). Esta tecnología de impresión 4D proporciona un nuevo enfoque para crear superficies 3D reversibles y promete nuevas posibilidades, entre otras, la implementación técnica de envolventes arquitectónicas vivas objeto de este estudio.

Los experimentos presentados al final de cada caso de diseño consisten en la creación, mediante impresión 3D, de elementos de geometrías simples como punto de partida, para observar su comportamiento y rango de respuesta para cada material activo utilizado. Estos ensayos muestran diferentes tipos de variaciones en la superficie del elemento, causados por los diferentes parámetros ambientales variables, demostrando así su capacidad material para responder rápidamente a estos estímulos externos. A través de estos experimentos se intenta explorar la relación entre la investigación de materiales activos y su respuesta a los estímulos externos temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono, buscando formas significativas de conexión entre la inspiración natural y la implementación técnica (López *et al*., 2015).

Por último, es importante señalar que la selección de los materiales activos es un aspecto fundamental a tener en cuenta, desde una perspectiva responsable según criterios de ecodiseño y sostenibilidad, para evitar que los posibles beneficios ambientales obtenidos sobre la metodología biomimética no se vean comprometidos.

3.6.2 Diseño adaptativo

En este caso, la adaptabilidad se manifiesta a través de las características morfológicas en las envolventes arquitectónicas. El diseño adaptativo queda definido en las envolventes arquitectónicas a través de la creación de patrones como criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño de la envolvente. Se detallan unas pautas como disposiciones y configuraciones, más que formas finales o fórmulas predeterminadas.

Un patrón es un modelo utilizado como muestra para obtener otro diseño similar. En términos arquitectónicos, históricamente, el patrón se ha considerado como un elemento que forma parte del ornamento o la decoración. El patrón como un diseño decorativo y repetitivo, que generalmente transmite ritmo o movimiento, con una gran conexión con la matemática a través de relaciones de rotación o simetría (Beeby, 1977). Recientemente se puede observar un resurgimiento en el interés por incluir la ornamentación en la arquitectura a través de los patrones (Liotta & Belfiore, 2012) (Imhof & Gruber, 2013). Este interés, en parte, se debe a la evolución de las técnicas de fabricación digital, las cuales permiten la producción de complejas formas y patrones sobre superficies arquitectónicas (Lynn, 2004) (Caetano, 2015).

En esta investigación, se aborda el estudio de los patrones de diseño arquitectónico desde la inspiración de los patrones estomáticos de las plantas. A lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 se presentarán estudios de los patrones estomáticos de diversas plantas representativas de cada zona climática, según los parámetros densidad, distribución y geometría, expuestos en el apartado 3.5.2.1 del presente capítulo (Figura 3.30). Los resultados obtenidos en estos análisis se aplicarán a la generación de patrones en envolventes arquitectónicas como soluciones de diseño pasivo. Tras la lectura biológica, el reto consiste en la creación de un patrón transferible al lenguaje arquitectónico. El objetivo es mostrar el potencial de las adaptaciones de las plantas como herramienta para crear patrones innovadores para las envolventes de edificios. A través del análisis de los diferentes patrones estomáticos se interpreta la relación de la planta con el clima, con el fin de extraer y abstraer aplicaciones de diseño sugerentes sobre la envolvente mediante la creación de patrones como texturas.

Se trata de ordenar, mediante la geometría, las lógicas básicas halladas en los patrones estomáticos, para su desarrollo como estrategias o técnicas para el diseño de envolventes. Generación de patrones como secuencias lógicas de diseño que configuran ritmos y tramas variables en las envolventes, más que plantillas o soluciones formales finales (Gausa *et al.* 2002). Los patrones son utilizados como una herramienta para crear y organizar espacialmente la porosidad de la envolvente, determinando la permeabilidad de la misma a través de la proporción de opacidad y transparencia en la superficie.

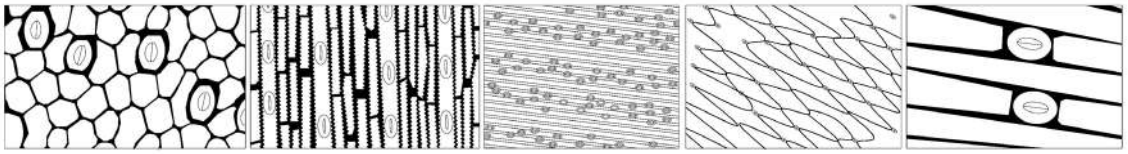


Figura 3.30
Geometrías extraídas del análisis de diversos patrones estomáticos.

3.7 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha detallado la metodología para la generación de diseños conceptuales de envolventes arquitectónicas vivas. El método de diseño investiga las adaptaciones de las plantas en los diferentes climas europeos definidos para buscar una convergencia entre dichas estrategias encontradas en la naturaleza y los requerimientos en la envolvente del edificio. Con el fin de guiar al arquitecto o ingeniero a través del proceso de diseño propuesto, se ha realizado un diagrama orientativo (Figura 3.8).

El proceso de diseño consiste en una fase previa de exploración (BIOLOGÍA) cuyo objetivo es la indagación y recogida de información biofísica. La exploración de la biomecánica y morfología funcional de los grupos de plantas seleccionados en los diferentes biomas se organiza según los conceptos de: desafío, función y estrategia. Seguidamente las fases de abstracción y valoración (TRANSICIÓN) facilitan la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas implementaciones técnicas para las envolventes. Se propone un sistema de recopilación de datos para organizar los ejemplos biológicos explorados, según su sistema estructural de adaptación se considere mecanismo dinámico o estrategia estática, en cada tipo de clima y de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

Una vez categorizados diversos ejemplos de adaptación, se valoran los estomas como estructuras de especial interés para generar diseños conceptuales como fase de diseño preliminar. Se sugiere un nuevo tipo de adaptabilidad para las envolventes, como la combinación de un funcionamiento adaptativo más un diseño adaptativo (ARQUITECTURA). El primero se abordará mediante el estudio las posibilidades de fabricación de sistemas sensibles, en los que materiales activos pueden reaccionar al medio y deformarse con el paso del tiempo, dependiendo de los diferentes estímulos ambientales. El diseño adaptativo, en cambio, se afronta definiendo una serie de criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño de la envolvente, como disposiciones y configuraciones, más que formas finales o fórmulas predeterminadas.

En resumen, la metodología "De las plantas a la arquitectura" (Figura 3.31) crea un sistema de exploración de los principios biológicos de adaptación en las plantas y su transferencia a implementaciones técnicas, de utilidad para arquitectos e ingenieros. La metodología proporciona las pautas de trabajo, a través de diferentes fases desde la biología a la arquitectura, que concluyen finalmente en la generación de diseños conceptuales como paso previo al desarrollo técnico. El diseño conceptual pone en valor toda la información biológica estudiada, sus posibles ideas de aplicación para el desarrollo de sistemas constructivos teniendo en cuenta los retos de diseño en los edificios y los posibles beneficios a obtener.

Los siguientes capítulos (4, 5 y 6) ponen en práctica la metodología para resolver problemas particulares en zonas climáticas determinadas, mediante el desarrollo de tres casos de diseño de envolventes arquitectónicas vivas. Para cada bloque climático se identificarán fenómenos biológicos relevantes y se ilustrarán soluciones de diseño posibles, además de diversos experimentos con materiales activos.

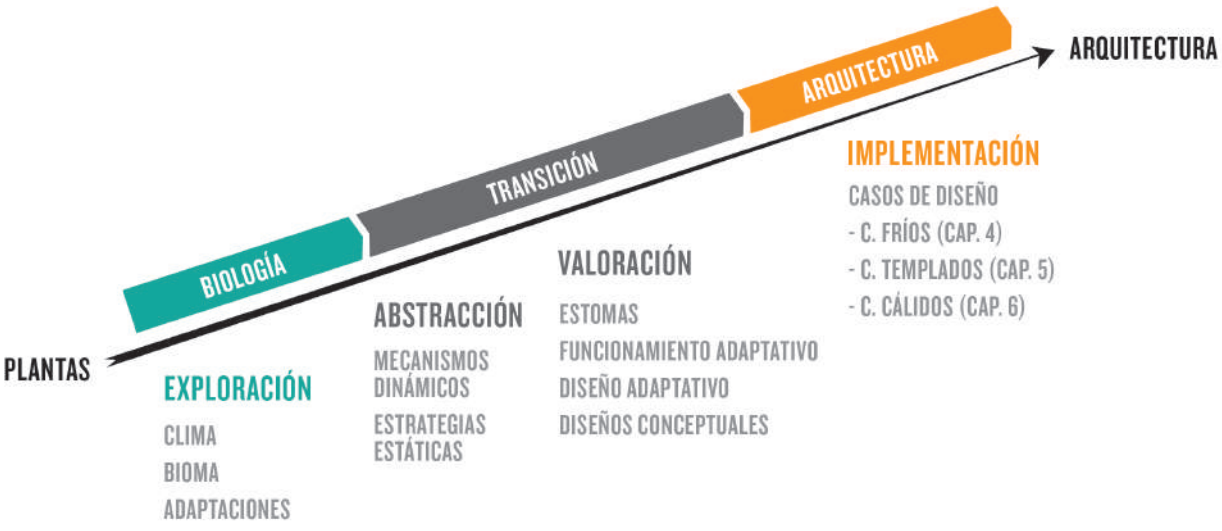


Figura 3.31
Resumen gráfico de la metodología "De las plantas a la arquitectura".

Conclusions

Throughout this chapter a methodology to generate conceptual designs of envelopes, according to a selection of different strategies and mechanisms of adaptation of some plants to their respective habitats, has been presented. The proposed methodology, called *"From plants to architecture"*, consists of several stages in order to facilitate the transition from biological inspiration to technical implementation by providing a useful tool for the concept design generation of living architectural envelopes. The main steps in the process are: exploration, abstraction, evaluation and implementation. They are chained in a linear way to achieve the transfer of knowledge from the plants inspiration to the development of new architectural solutions. The developed methodology is ordered according to three differentiated blocks according to their content: a first one related to the biological exploration, called "Biology"; a final part related to architectural development, called "Architecture"; and an intermediate part, as a way of connection of the two previous ones, called "Transition" (Figure 3.26).

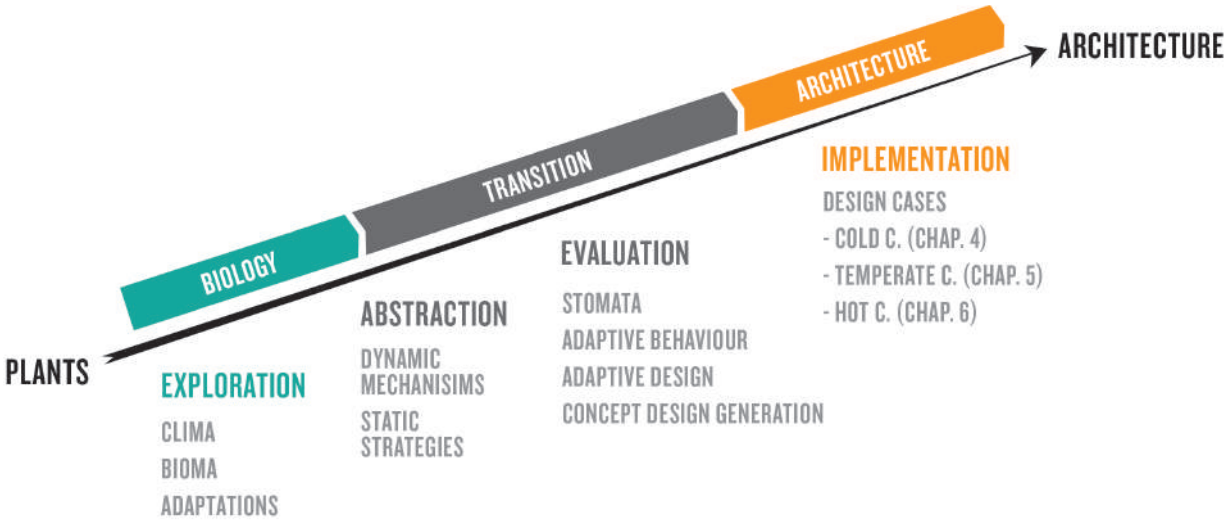


Figure 3.32
The graphic concept of the "From plants to architecture" methodology.

In the first biology block and taking the Worldwide Bioclimatic Classification System by Salvador Rivas-Martínez as a reference, three main climatic groups are defined in Europe. Different plant adaptations are explored in terms of challenge, function and strategy. The first stage in the transition block is the abstraction process, where a data collection is created. The core of this data collection is the movement, resulting in two approaches - dynamic or static - being considered from now on the ways that plants have adapted in response to challenges as dynamic mechanisms and static strategies. Second stage of transition block is the evaluation process, in which stomata have been selected as organisms of special interest. Design concept generation is the last step in the evaluation process, and the previous step to technical implementation. Design concept generation puts in value all the biological information studied, its potential ideas of application for the development of constructive systems taking into account the design challenges for buildings and the benefits to obtain. Finally, the architecture block refers to technical implementation of selected design concepts, in form of design cases, prototyping, fabrication, system validation and evaluation of results. Living architectural envelope will be configured by the combination of an adaptive behaviour and design. A new kind of adaptability is suggested for adaptive behaviour, where several key functions are defined according to the demands of the users within the building. It takes as a reference the standard regulations CTE and ASHRAE, depending on the type and level of activity, as well as environmental parameters humidity, temperature, light and carbon dioxide. Potential sensitive manufacturing systems are studied, through active materials with innate properties capable to react to environmental stimuli and deform across time. Adaptive design is manifested through morphological features in the architectural envelope design, defining a series of strategic criteria in formal decisions, such as dispositions and configurations, rather than final forms or predetermined formulas.

The following chapters (4, 5 and 6) put into practice the methodology to solve particular problems in specific climatic zones, by developing three design cases of living architectural envelopes. For each major climatic block, relevant biological phenomena and potential design solutions will be identified, as well as various experiments on active materials, will be illustrated.

Referencias

Addington, M., Schodek, D. (2004). *Smart Materials and Technologies. For the Architecture and Design Professions.* Oxford, United Kingdom: Architectural Press.

Alcaraz F J, (2013) *Bioclimatología*, Geobotánica, Tema 2, Universidad de Murcia, disponible en http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema02.pdf (consultado en 2016).

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, disponible en https://www.ashrae.org/home (consultado en 2016).

ASKNATURE, disponible en https://asknature.org (consultado en 2016)

Attenborough D., (1995) *The private life of plants*: Princeton University Press.

Azcón-Bieto J, Talón M., (200) *Fundamentos de fisiología vegetal.*Barcelona: McGraw-Hill Interamericana.

Barthlott, W. & Neinhuis, C., (1997) *Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces*, Planta 202: 1. doi:10.1007/s004250050096

Baumeister D, Tocke R, Dwyer J, Ritter S, Benyus J., (2013) *The Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices.* Biomimicry 3.8: Missoula.

Beeby, T. H., (1977) *The Grammar of Ornament/ Ornament As Grammar.* VIA III Ornament, pp. 11-29.

Bethke, P. y M. Drew. (1992) *Stomatal and nonstomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of Capsicum annum L. during progressive exposure to NaCl salinity.* Plant Physiology 99: 219-226.

Bhushan B., (2009) *Biomimetics: lessons from nature–an overview*, Phil. Trans. R. Soc. A 2009 367 1445-1486; DOI: 10.1098/rsta.2009.0011.

Biomimicry Institute, *Function and Strategy*, disponible en http://toolbox.biomimicry.org/core-concepts/function-and-strategy/ (consultado en 2016)

BIOMIMICRY 3.8, disponible en https://biomimicry.net (consultado en 2016)

Bogatyreva, O., Pahl, A.-K., and Vincent, J.F.V., (2002) Enriching TRIZ with biology. TRIZ Future: Proceedings ETRIA World Conference, Strasbourg.

Bogatyreva, O., Pahl, A.-K., Bowyer, A., and Vincent, J.F.V., (2003) *Data gathering for putting biology in TRIZ.* Proceedings of TRIZcon 2003, Altshuller Institute, USA, 16–18 March.

Bustamante W., (2009) *Guia de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.* División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa País de Efi- ciencia Energética (CNE), Santiago de Chile.

Caetano, I, (2015) *DrAFT: An Algorithmic Framework for Facade Design,* INESC-ID/Instituto Superior Técnico, disponible en https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113702568/DISSERTACAO%20FINAL-%20Ines%20Caetano%2067110%20MA.pdf (consultado en 2017)

Croxdale, J., (2000) *Stomatal patterning in angiosperms.* American Journal of Botany 87 (8): 1069-1080

CTE, Código Técnico de la Edificación, disponible en http://www.codigotecnico.org (consultado en 2016)

DB-HE, Documento Básico Ahorro de energía, Código Técnico de la Edificación, disponible en http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf (consultado en 2016)

DB-HS, Documento Básico Salubridad, Código Técnico de la Edificación, disponible en http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf (consultado en 2016)

Fiorito F, Sauchelli M, Arroyo D, Pesenti M, Imperadori M, Masera G, Ranzi G., (2016) *Shape morphing solar shadings: a review.* Renew Sustain Energy Rev;55:863–84. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086.

García J C, (2011) *Biogeografía, Los factores de distribución de los seres vivos*, Universidad de Cantabria, disponible en http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia/materiales/pdfs-temas/2%2C%20Los%20factores%20de%20distribucion%20de%20los%20seres%20vivos.pdf (consultado en 2016)

Gausa M, Guallart V, Müller W, Soriano F, Morales J, Porras F, (2002) *Diccionario Metápolis de la Arquitectura Avanzada*, Actar: Barcelona.

Ge Q., Dunn C. K., Qi H. J., and Dunn M. L., (2014) *Active Origami by 4D Printing*, Smart Materials and Structures, 23, 094007-15.

Ge, Q., Qi, H. J., Dunn, M. L. (2013). *Active materials by four-dimension printing*. Applied Physics Letters, 103(13): 131901. doi: 10.1063/1.4819837

Ge Q., Sakhaei A., Lee H., Dunn C. K., Fang N. X., Dunn M. L., (2016) *Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers,* Scientific Reports, 6:31110

Gibson, L., (2012). *The hierarchical structure and mechanics of plant materials.* Journal of the Royal Society Interface, 12, 106. doi: 10.1098/rsif.2012.0341

Givoni B, A. (1969) *Man, Climate and Architecture.* Elsevier Architectural Science Series. Editor Henry J. Cowan; Professor of Architectural Science; University of Sydney. 444-20039-8. Library of Congress Catalog Card 69-15822.

Holdrige, L.R. (1967) *Life zone ecology.* 206 pp. San José.

Imhof, B., Gruber, P., (2013) *What is the Architect Doing in the Jungle? Biornametics*, 2013, Ed: Springer Vienna, doi:10.1007/978-3-7091-1529-9

INSTITUTE OF MAKING disponible en http://www.instituteofmaking.org.uk (consultado en 2016)

Kakani, V. G., Reddy K. R., Zhao, D., & Mohammed, A. R. (2003). *Effects of Ultraviolet B Radiation on Cotton (Gossypium hirsutum L.)* Morphology and Anatomy. Annals of Botany, 91(7), 817–826. http://doi.org/10.1093/aob/mcg086

Kennedy E, Fecheyr-Lippens D, Hsiung B, Niewiarowski PH, Kolodziej M., (2015) *Biomimicry: a path to sustainable innovation*. Design Issues, Summer 2015, 31. Massachusetts Institute of Technology. p. 66–73. http://dx.doi.org/ 10.1162/ DESI_a_00339.

KEW, Royal Botanic Gardens, Kew, disponible en http://www.kew.org (consultado en 2016)

Knippers J., Speck,T., (2012) *Design and construction principles in nature and architecture.* Bioinspir. Biomim. 7, 015002.

Kobayashi K., (2005) Japan for sustainability JFS Newsletter No.31 Biomimicry Interview Series: No.6 Technologies Learned from Living Things: Concepts and Examples - Front Line Reports “Shinkansen Technology Learned from an Owl?” - The story of Eiji Nakatsu, disponible en http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027795.html (consultado en 2016)

Koch, K., Bhushan, B., and Barthlott, W. (2009) *Multifunctional surface structures of plants. An inspiration for biomimetics.* Philosophical Transactions of the Royal Society, 367, 1487-1509. doi: 10.1098/rsta.2009.0022

Köppen, W. (1918) *Klassification der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf.* Petermmans Geogr. Mitt. 64: 193-203, 243-248.

Köppen, W. (1936) *Grundiss der Klimakunde*. 2 Aufl. 388 pp + 9 tables. Berlin & Leipzig.

KOEPPEN, World Maps of Köppen-Geiger Climate Classification, disponible en http:// koeppen-geiger.vu-wien.ac.at (consultado en 2017)

Lerner, L., (1991) Genrich Altshuller: Father of TRIZ. Ogonek (Russian Magazine), disponible en: http://www.aitriz.org/articles/altshuller.pdf

Lienhard, J., Scheleicher, S., Poppinga, S., Masselter,T., Mil-Wich, M., Speck,T., Knippers, J. (2011) *Flectofin: a hinge-less flap- ping mechanism inspired by nature.* Bioinspir. Biomim. 6, 045001.

Liotta, S.J, Belfiore, M, (2012) *Patterns and Layering.* Japanese Spatial Culture, Nature and Architecture, Ed: Gestalten

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles.* J Facade Des Eng;3(1):2015. http://dx.doi.org/10.3233/FDE-150026.

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Adaptive architectural envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control.* In: Proceedings of the 10th conference on advanced building skins, Bern, Switzerland; November 2015.

Lynn, G., (2004) *The Structure of Ornament. Conversation with Neil Leach.* Digital Tectonics, disponible en http://designtheory.fiu.edu/readings/lynn_structure_of_ornament.pdf (consultado en 2016)

Martin, E. S., Donkin, M. E. and Stevens, R. A. (1983). *Stomata*, London: Edward Arnold.

MATERFAD disponible en http://blog.materfad.com (consultado en 2016)

McKeag T., (2012) *Estudio de caso: formas prometedoras,* Zygote Quarterly: zq 02 disponible en https://zqjournal.org/?work=zq02es (consultado en 2016)

Menges, A. (2012) *Material Computation*. Higher Integration in Morphogenetic Design. Architectural Design, 82, London, United Kingdom: Wiley Academy.

Nilsen, E.T., (1991) *The relationship between freezing tolerance and thermotropic leaf movement in five Rhododendron species*, Oecologia 87: 63. doi:10.1007/BF00323781

Omer AM., (2008) *Renewable building energy systems and passive human comfort solutions.* Renew Sustain Energy Rev;12(6):1562–87. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.010.

Omrany H, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A, Raahemifar K, Tookey J., (2016) *Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: a comprehensive review.* Renew Sustain Energy Rev;62:1252–69. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.010.

Pacheco R, Ordóñez J, Martínez G., (2012) *Energy efficient design of building: a review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews;16(6):3559–73. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045.

PBG, Plant Biomechanics Group, disponible en https://www.botanischer-garten.uni-freiburg.de/mitarbeiter/pbg (consultado en 2016)

Perés-Martínez, J, Arizaleta, M, Sanabria, M.E, Brito, L. (2004). *Características de los estomas, densidad e índice estomático y su variación en función a la injestación en Annona muricata L. y A. montana MADFAC.* Bioagro, 16(3), 213-218, disponible en http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612004000300008 (consultado en 2016)

Raviv, D., Wei, Z., McKnelly, C., Papadopoulou, A., Kadambi, A., Shi, B., et al. (2014). *Active printed materials for Complex self-evolving deformations.* Scientific Reports 4, 7422. doi:10.1038/srep07422

Rivas-Martínez S., (2011) *Worldwide Bioclimatic Classification System*. Global Geobotany;1(1). disponible en http://dx.doi.org/10.5616/gg110001 (consultado en 2016).

RITE, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios disponible en http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx (consultado en 2016).

Rubino, P., E. Tarantino y F. Rega, (1989) *Relationship between soil water status and stomatal resistance of tomatoes.* Irrigacione e Drenaggio 36: 95-98

Ryu, J., D'Amato, M., Cui, X., Long, K. N., Qi, H. J., Dunn, M. L. (2012). *Photo-origami. Bending and folding polymers with light,* Applied Physics Letters, 100(16), 161908.

Salas, J., M. Sanabria y R. Pire. (2001) *Variación en el índice y densidad estomática en plantas de tomate (Lycopersicon esculentum Mill.) sometidas a tratamientos salinos.* Bioagro 13(3): 99-104.

Sánchez, M., y J. Aguirreolea. (1996) *Relaciones hídricas.* En: B.J. Azcon., y M. Talón, editores, Fisiología y bioquímico vegetal. Edigrafos, Madrid, p. 49-90.

Speck, T. Speck O., (2008) *Process sequences in biomimetic research.* C.A. Brebbia, Design and Nature IV, WIT Press, Southampton: pp. 3-11

Taiz L, Zeiger E, (2007) *Fisiologia Vegetal*, Volumen 1, Universidad Jaume I, Servicio de comunicación y publicaciones.

Taylor, S. H., Franks, P. J., Hulme, S. P., Spriggs, E., Christin, P. A., Edwards, E. J., Woodward, F. I. and Osborne, C. P. (2012), *Photosynthetic pathway and ecological adaptation explain stomatal trait diversity amongst grasses.* New Phytologist, 193: 387–396. doi:10.1111/j.1469-8137.2011.03935.x

Thornthwaite, C.W. (1931) *The climates of North America according to a new classification.* Geogr. Rev. 21: 633-655.

Thornthwaite, C.W. (1933) *The climates of the Earth.* Geogr. Rev. 23: 433-440.

Tibbits, S. (2014) *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, Architectural Design, 84: 116–121.

Tibbits S, McKnelly C, Olguin C, Dikovsky D, Hirsch S, (2014) *4D Printing and Universal Transformation*, Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture 2014 Los Angeles, CA, pp. 539-548.

Toral, M, Manríquez, A, Navarro-Cerrillo, R, Tersi, D, & Naulin, P. (2010) *Características de los estomas, densidad e índice estomático en secuoya (Sequoia sempervirens) y su variación en diferentes plantaciones de Chile.* Bosque (Valdivia), 31(2), 157-164. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000200009

Troll, C. & Paffen, K. (1964) *Die Jahreszeitenklimate der Erde.* (Summary: The seasonal climates of the Earth). Erkunde 18: 1-28 + map.

VELCRO Brand history, disponible en http://www.velcro.com/about-us/history (consultado en 2016)

Vincent, J.F.V., Bogatyrev, O.A., Bogatyreva, N.R., Bowyer, A., and Pahl, A.K., (2006) *Biomimetics – its practice and theory.* Journal of the Royal Society Interface, 3.

Vogel, S. (2012) *The life of a leaf*, University of Chicago Press.

Walter, H, (1977) *Zonas de vegetación y clima*, Ed. Omega: Barcelona

Wilkinson, H. (1979) *The plant superface (mainly leaf)*. In: C.R. Metcalfe y Chalk (eds.) Anatomy of Dicotyledons. Oxford, Claredon Press. London. pp. 97-165

Willmer, C., Fricker, M., (1996) *Stomata*, Volume 2 Topics in plant functional biology, Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-011-0579-8

WIPO World Intellectual Property Organization, *Hooked on Innovation*, disponible en http://www.wipo.int/ipadvantage/en/details.jsp?id=2658 (consultado en 2016)

Wolkoff P, Søren Kjærgaard K, (2007) *The dichotomy of relative humidity on indoor air quality*, Environment International, Volume 33, Issue 6, Pages 850-857, ISSN 0160-4120, http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2007.04.004.

WBCS, Worldwide Bioclimatic Classification System 1996-2017, disponible en http://www.globalbioclimatics.org/default.htm (consultado en 2017)

Pinus sylvestris

CAPÍTULO 4

Climas fríos

"... Le Corbusier me preguntó si tenía ideas sobre el futuro de su arte... Le contesté que la arquitectura sería blanda y peluda".

Salvador Dalí, 1956,
Los Cornudos del Viejo arte moderno, TUSQUETS Editores (1990)

CHAPTER 4

Cold climates

Abstract

High-latitude regions are subject to the cold Polar and Boreal climates. They prevent and limit the activity of living beings, giving rise to specific biomes conditioned by low temperatures. These extensive areas include permanently covered with ice, polar deserts, tundra, taiga or boreal forest, and polar seas areas. This chapter focuses on the tundra and the taiga, as biomes where great biological productivity is developed, as far as plant communities are concerned. In the tundra, broad areas are covered with herbaceous plats and shrubs, whereas in the taiga coniferous forests as well as other species at its southernmost limit, abound. As previously explained, in Chapter 2, this research is only concerned with adaptations of plants because they lack displacement and, unlike animals, remain more exposed to changing environmental conditions. In these kind of cold climates, the conditions of cold and lack of light during the winter will be observed. These factors limit the life, especially of the plants. Throughout this chapter different adaptation strategies explored in the plants of cold regions will be studied for potential applications in architectural envelopes in cold climates, following the methodology *"From the plants to the architecture"* presented in Chapter 3. Aridity and lack of light will result extreme solutions of mechanisms and strategies, with great potential for technical applications in the design of envelopes.

The chapter begins with an introduction to the polar and boreal climatic characteristics, through the interpretation of bioclimatic diagrams of different cities in these regions. In section 4.3, tundra and taiga biomes and their respective plant communities are analysed. Research has been focused on the study of the adaptations of the plants to climatic conditions. Point 4.4 develops the exploration of biophysical information, with a description of the challenges that these plants have to face, according to these environmental parameters: temperature, humidity, light and carbon dioxide. An extensive research for biological models of adaptation to low temperatures, water deficit and the lack of light during the winter (limiting factors for the development), is presented. Once the biophysical information is obtained, all the examples of interest are listed (point 4.5). The proposed classification organizes the structural systems of plants adaptation to cold regions according to dynamic mechanisms or static strategies (for every environmental parameter). This classification aims to facilitate the transfer of knowledge from the inspiration in the plants to the development of new architectural solutions.

Point 4.6 makes an assessment of the structural adaptation systems studied, stressing stomata as one of the main structures of special interest. Stomata have a wide presence in the species that evolved, adopting adaptive solutions to cold climates, both as dynamic mechanisms and static strategies. After considering the interest of the stomata in the process of biomimetic inspiration, the study of its functions and structural systems is deepened. The role of stomata in different plants representing cold climates is analyzed, with the objective of transferring them to conceptual designs for architectural envelopes throughout section 4.8. Finally, in section 4.9, a case of theoretical envelope design is presented, through dynamic and static adaptive behaviour, in addition to its adaptive design. Section 4.10 details the conclusions of the chapter.

4.1 Introducción

Las regiones de altas latitudes se encuentran sometidas a los climas fríos Polar y Boreal (Figura 4.1), que impiden o limitan la actividad de los seres vivos, dando lugar a biomas originales condicionados por las bajas temperaturas. Las extensas superficies ocupadas incluyen áreas permanentemente cubiertas de hielo, desiertos polares, la tundra, la taiga o bosque boreal, y los mares polares (Codron, 2011). El presente capitulo dedicado a los climas fríos se centra en la tundra y la taiga, por ser los biomas donde mayor productividad biológica se desarrolla, en lo que a comunidades vegetales se refiere, ya que en la tundra se encuentran cubiertas herbáceas y arbustivas, y la taiga está dominada por bosques de coníferas además de otras especies en su límite más meridional.

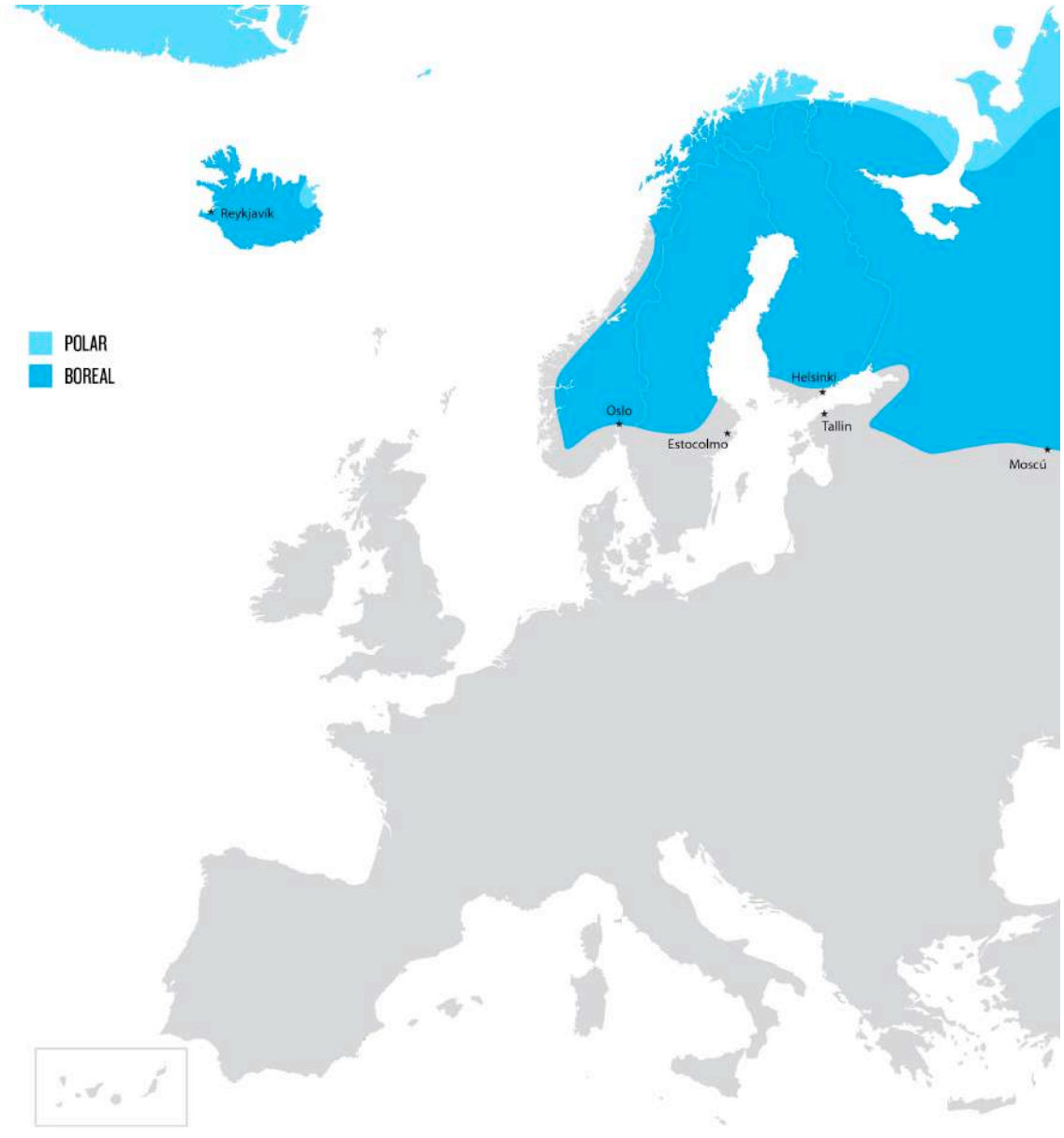


Figura 4.1
Mapa de las regiones frías en Europa, macrobioclimas Polar y Boreal. Reelaboración a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017)

Como ya se ha justificado anteriormente, en el capítulo 2, esta investigación se interesa únicamente en las adaptaciones de las plantas por carecer de desplazamiento y, a diferencia de los animales, permanecer más expuestas a las cambiantes condiciones ambientales. En el recorrido por los climas fríos se observará cómo las condiciones de frío y falta de luz durante el invierno limitan la vida, especialmente la de las plantas. A lo largo de este capítulo diferentes estrategias de adaptación exploradas en las plantas de las regiones frías serán estudiadas para posibles aplicaciones en envolventes arquitectónicas en climas fríos, siguiendo la metodología De las plantas a la arquitectura presentada en el capítulo 3. De las adaptaciones al frío, a la aridez y a la falta de luz surgirán soluciones extremas de mecanismos y estrategias, con un gran potencial para aplicaciones técnicas en el diseño de envolventes.

El capítulo comienza con una introducción a las características climáticas polar y boreal, mediante la interpretación de bioclimogramas de diferentes ciudades situadas en regiones pertenecientes a dichos climas. En el punto 4.3 se analizan los biomas tundra y taiga y sus respectivas comunidades vegetales, centrando el estudio en las adaptaciones de las plantas a las condiciones climáticas. El punto 4.4 desarrolla la exploración de la información biofísica, con una descripción de los desafíos a los que tienen que hacer frente dichas plantas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono y una extensa búsqueda de modelos biológicos de adaptación a las bajas temperaturas, el déficit hídrico y la falta de luz durante el invierno, como factores limitantes para el desarrollo en las regiones de climas fríos. Una vez obtenida la información biofísica, en el punto 4.5 se ordenan todos los ejemplos hallados de interés, según una clasificación que organiza los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones frías según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. El punto 4.6 realiza una valoración de los sistemas estructurales de adaptación estudiados, destacando los estomas como estructuras de especial interés, con amplia presencia en las especies que evolucionaron y adoptaron soluciones adaptativas a los climas fríos, tanto como mecanismos dinámicos como estrategias estáticas. Tras considerar el interés de los estomas en el proceso de inspiración biomimética, se profundiza en el estudio de su funcionamiento y sus sistemas estructurales a través de diversas plantas representativas de climas fríos, para poder transferirlos a diseños conceptuales para envolventes arquitectónicas a lo largo del punto 4.8. Finalmente, en el apartado 4.9, se presenta un caso de diseño teórico de envolvente, mediante el funcionamiento adaptativo dinámico y estático (tectónica) y la definición de su diseño adaptativo (características morfológicas). En el punto 4.10 se detallan las conclusiones del capítulo.

4.2 Climas

4.2.1 Macrobioclima Polar

Tomando como referencia la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017) se considera que tienen macrobioclima polar, a cualquier altitud y valor de continentalidad, todos los territorios de las zonas templada y fría a partir del paralelo 72º Norte, cuyos valores termoclimáticos tengan una temperatura positiva anual inferior a 380 (Tp < 380). En las regiones de macrobioclima polar los inviernos son largos, oscuros y fríos, manteniéndose las temperaturas medias por debajo de 0ºC hasta ocho meses al año, llegando incluso a alcanzar los -50ºC y con vientos fuertes y secos. El suelo permanece cubierto de nieve que actúa de aislante térmico, protegiendo la vegetación del frío y el viento. Los veranos son breves y frescos, y el sol aporta escaso calor al suelo ya que la radiación es siempre rasante y gran parte de ella se refleja en la nieve o es consumida por su fusión. Las precipitaciones, en general, son escasas y se producen preferentemente en verano, sin embargo no existe aridez, ya que las tasas de evaporación y evapotranspiración son muy bajas a causa de las bajas temperaturas y el ambiente resultante suele ser siempre húmedo en la mayor parte de los lugares. Como visualización de estas características climáticas se adjuntan dos bioclimogramas o diagramas climáticos de las estaciones situadas en las ciudades de Sletnes en Noruega (Figura 4.2) y Russkaya Gavan en Rusia (Figura 4.3), pertenecientes al macrobioclima polar. Los diagramas han sido extraídos de la base de datos de la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017) e indican las relaciones de las temperaturas y precipitaciones medias a lo largo del año en las diferentes estaciones de Noruega y Rusia, obteniendo “las bases más importantes para valorar el clima desde el punto de vista ecológico” (Walter, 1977). De la lectura de los diagramas se reflejan las bajas temperaturas del macrobioclima polar, alcanzando una temperatura media anual de 1,5ºC y -7,5ºC en Sletnes y Russkaya Gavan respectivamente, siendo la temperatura media de las máximas del mes más cálido de 17,5ºC en Sletnes, y 6,7ºC en Russkaya Gavan; o la temperatura media de las mínimas del mes más frío de -12,9ºC en Sletnes y -21,7ºC en Russkaya Gavan.

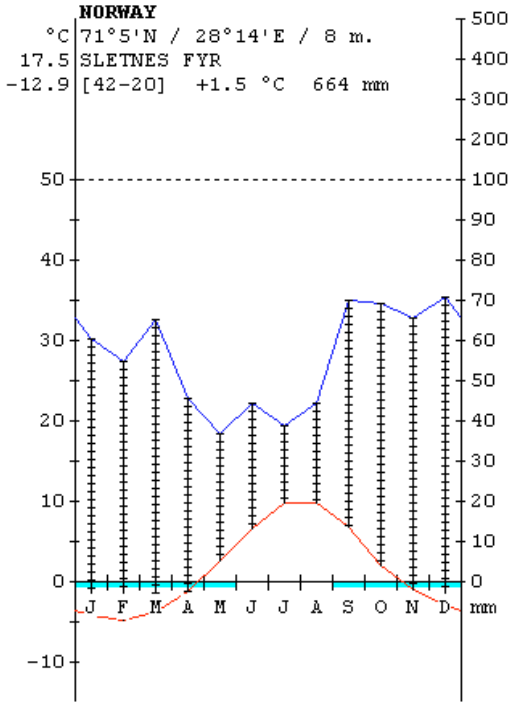


Figura 4.2
Bioclimograma de Sletnes, Noruega.
Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

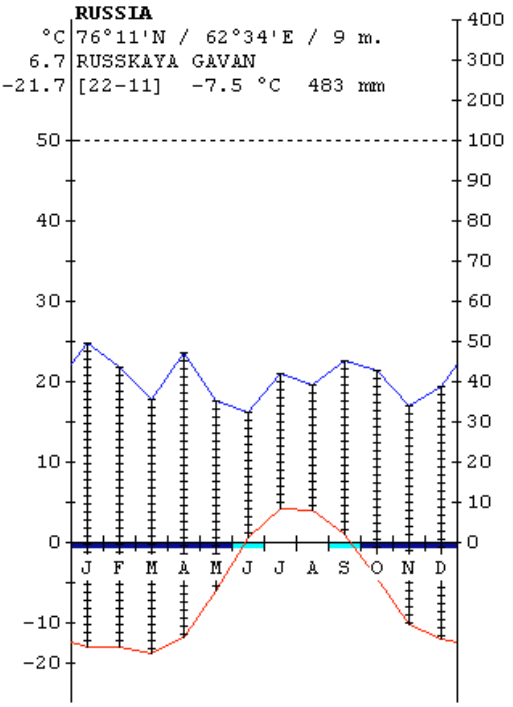


Figura 4.3
Bioclimograma de Russkaya Gavan, Rusia.
Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

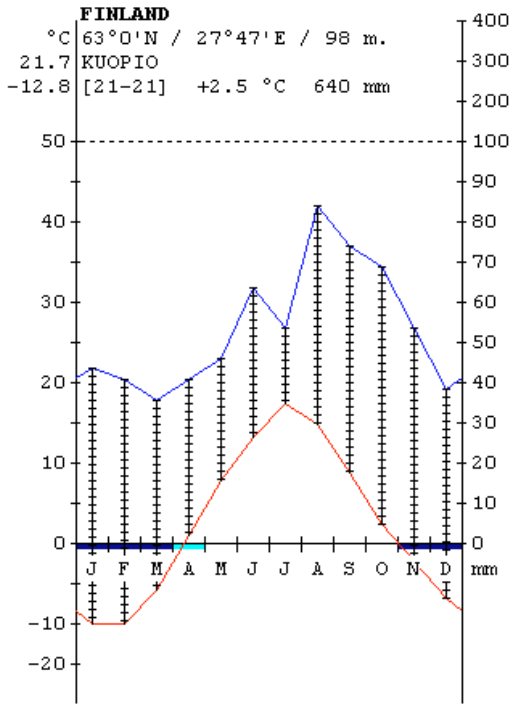


Figura 4.4
Bioclimograma de Kuopio, Finlandia.
Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

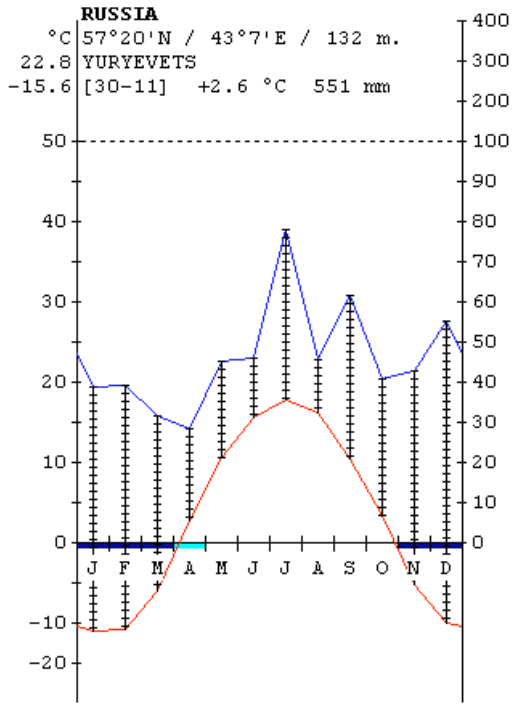


Figura 4.5
Bioclimograma de Yuryevets, Rusia.
Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

4.2.2 Macrobioclima Boreal

Tomando como referencia la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017) se considera se considera que tienen macrobioclima boreal, a cualquier altitud y valor de continentalidad, todos los territorios de las zonas templada y fría comprendidos entre las latitudes 42º a 72º Norte. La clasificación establece unos valores de temperatura media anual T, inferiores al rango de entre 5,3ºC y 3,8ºC en función del índice de continentalidad Ic, el cual expresa la amplitud de la oscilación anual de la temperatura. Los valores establecidos son: Ic < 21, T < 5.3ºC; Ic = 21-28, T < 4.8ºC; Ic > 28, T < 3.8ºC. El macrobioclima boreal se caracteriza por ser muy continental, con una gran amplitud térmica, donde los inviernos son prolongados y extremadamente fríos y los veranos son tibios y breves pero más prolongados que en el polar. La oscilación térmica entre el invierno y el verano es la mayor de todos los climas, siendo de más de 40ºC e incluso llegar hasta 60ºC en los casos más extremos. Las precipitaciones varían entre los 500 mm y los 1.000 mm anuales, aunque no son abundantes no se trata de un macrobioclima seco, pues las bajas temperaturas mantienen la humedad relativa alta. La mayor parte de las precipitaciones caen en verano, cuando llegan las masas de aire polar marítimo, aunque casi siempre son en forma de nieve. El agua circula en los meses en que la temperatura media está por encima de los 0ºC, aproximadamente cinco meses, y el resto del año está congelada. Como visualización de estas características climáticas se adjuntan dos bioclimogramas de las estaciones situadas en las ciudades de Kuopio en Finlandia (Figura 4.4) y Yuryevets en Rusia (Figura 4.5), pertenecientes al macrobioclima boreal, extraídos de la base de datos de la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017). De la lectura de los diagramas se reflejan las grandes amplitudes térmicas del macrobioclima boreal, siendo la oscilación de 34,5ºC en Kuopio y 38,4ºC en Yuryevets, con temperaturas medias de las máximas del mes más cálido de 21,7ºC y 22,8ºC y las mínimas del mes más frío -12,8ºC y -15,6ºC en Kuopio y Yuryevets respectivamente.

4.3 Biomas

4.3.1 Bioma Tundra

Características generales

La tundra constituye una franja de transición entre los hielos o desiertos polares y las regiones forestales de latitudes más bajas, ocupando en Eurasia las regiones del norte de Islandia, Escandinavia y Siberia. Debido a las bajas temperaturas y a la escasez de agua, causada por el permafrost o capa de hielo que cubre el suelo casi todo el año, y las escasas precipitaciones, este es un bioma donde el crecimiento de árboles se ve limitado, pero donde se desarrolla una cubierta herbácea y arbustiva, compuesta de líquenes, musgos, cárices, hierbas perennes y arbustos enanos básicamente. La tundra es muy extensa y da lugar a una gran diferenciación según la latitud, siendo la cubierta vegetal discontinua de norte a sur. Hacia el norte la vegetación se empobrece caracterizándose por líquenes dispersos y musgos sobre las superficies de las rocas o incluso hierbas en las grietas. En la zona central, la de mayor extensión, crecen musgos y algunos arbustos enanos. Hacia el sur las condiciones se hacen más favorables para la vegetación y esta se va enriqueciendo, dando paso a la llamada tundra arbolada, como transición entre la tundra y los bosques boreales. En general la tundra meridional se caracteriza por la presencia de arbustos leñosos, como sauces, abedules y ericáceas enanas, en laderas bien drenadas con permafrost más profundo, además de gramíneas, matas almohadilladas, plantas en roseta y abundancia de plantas perennifolias que reinician su actividad con el derretimiento de las nieves (Walter, 1977) (Alcaraz *et al.,* 1999) (Codron, 2011). Numerosos autores (García, 1990) (Gerrard, 1990) (Rundel *et al.,* 1994) relacionan estas características propias de la tundra con otras áreas de montaña repartidas por todo el mundo, que pese a no pertenecer en sentido estricto a este tipo de bioma comparten similitudes con adaptaciones propias del incremento de altura. La tundra alpina es aquella que aparece en las altas montañas de otras latitudes de la Tierra, donde la altura es lo suficientemente elevada para que no puedan crecer árboles, y cuyas formaciones vegetales son parecidas, compartiendo además muchas especies de plantas con la tundra ártica. Se diferencian en que en las zonas de montaña no existen problemas de drenaje causados por el permafrost, además de que las temperaturas diurnas son más altas, entre otros. En Europa queda representada principalmente en los Alpes, los Pirineos y las cumbres de la Cordillera Cantábrica. Las cumbres de los otros sistemas montañosos ibéricos (Sistema Central, Ibérico, Sierra Nevada, etc,), albergan también matorrales y formaciones herbáceas con similitudes a las tundras alpinas, si bien tienen rasgos originales, al estar englobladas en macrobioclimas mediterráneos y tener los veranos secos y con sequías acusadas.

Adaptaciones generales

La vegetación de la tundra ha desarrollado diferentes adaptaciones para hacer frente a la escasez de agua, así como unas temperaturas invernales muy frías. Debido a estas adversas condiciones, algunas plantas han podido sobrevivir en estas regiones mediante la modificación de morfología para mitigar dichas limitaciones climáticas (Filella & Peñuelas, 1999) (Körner 1989) (Körner, 2003), como por ejemplo la reducción de tamaño o la formación almohadillada, ambas para resistir mejor al frío, usando las nieves invernales como protección. También el crecimiento en grupos les proporciona protección del viento y del frío. El color es otra de las adaptaciones, pues muchas han desarrollado hojas de color oscuro, algunas rojas, para absorber más energía solar y por tanto más calor. Otra adaptación para mantener el calor, y a su vez regular el balance hídrico y el intercambio gaseoso, es la pubescencia foliar o una densa capa de pelo sobre la superficie de la hoja (Molina-Montenegro, 2008). Además, muchas de las plantas son perennifolias o siempreverdes, manteniendo sus hojas vivas a lo largo de todo el año para poder realizar la fotosíntesis en los momentos que las condiciones ambientales lo permitan.

4.3.2 Bioma Taiga

Características generales

La Taiga es el bioma desarrollado al sur de la tundra, ocupando en Eurasia las regiones de Islandia, Escandinavia y Siberia. En las regiones de la taiga las temperaturas en invierno son extremadamente bajas, sin embargo en verano se moderan, que sumado a las precipitaciones y la prolongación de esta estación respecto a la tundra, permite el desarrollo de los árboles. La taiga, o bosque boreal ocupa una gran extensión y está dominada por las coníferas, y más hacia el sur se enriquece con especies propias de las regiones templadas de latitudes medias. La taiga europea, de carácter oceánico frío, presenta temperaturas moderadas y una amplitud térmica reducida, lo que da un carácter uniforme sin cambios bruscos, presentando una biodiversidad bastante reducida con dominio del abeto rojo *(Picea abies)* y el pino albar *(Pinus sylvestris)*, y ya hacia el este aparecen especies de pinos y alerces. Puntualmente aparecen árboles caducifolios, adaptados al frío y a la acidez de los suelos, como los álamos *(Populus)* y abedules *(Betula)*. En el suelo del bosque, al que penetra escasa luz, y en los troncos y ramas de los árboles crecen helechos, herbáceas, musgos, hepáticas y líquenes. Los incendios son de gran importancia en este bioma, pues favorecen la diversificación de especies y ayudan a aumentar la productividad en los siguientes años debido al aumento de la temperatura que provoca el derretimiento local del premafrost (Walter, 1977) (Alcaraz *et al.,* 1999) (Codron, 2011). Al igual que se señalaba en el anterior punto, algunos géneros bien representados principalmente de los climas fríos, pueden tener también especies o razas que habitan en las montañas mediterráneas, al tener las coníferas muy buena adaptación a la sequía, como es el caso del ciprés *(Cupressus)*, la sabina y el enebro (Juniperus) o varias especies de pinos *(Pinus sp.pl.)*, y abetos *(Abies pinsapo, Abies cephalonica*, etc…). Muchos de ellos han quedado aislados en las cumbres mediterráneas, y son testigos y superviviente de épocas mas frías, en los que los árboles y arbustos boreales, ocupaban las montañas del sur de Europa.

Adaptaciones generales

Las coníferas, piceas *(Picea)*, abetos *(Abies)* y pinos *(Pinus)* son los árboles que predominan el bosque boreal, habiendo desarrollado diversas adaptaciones según las diferentes épocas del año. En invierno, su morfología cónica permite la distribución uniforme de la carga de nieve, y las ramas flexibles apuntando hacia a abajo ayudan a arrojar el exceso de nieve evitando la rotura de las mismas. Además durante esta estación reduce la respiración al mínimo que junto a la forma acicular o en aguja de las hojas con cutículas gruesas y estomas hundidos logra evitar la pérdida de agua. El endurecimiento de las hojas para evitar la congelación es otra adaptación al invierno, permitiéndoles aguantar temperaturas de -40 a -60ºC sin sufrir daños. En verano la forma de cono logra captar la máxima radiación solar, que sumado a la diferenciación de acículas de sol y de sombra le permiten un máximo aprovechamiento de la luz disponible y su fotosíntesis es muy eficaz contrarrestando la brevedad del periodo estival. Hojas siempreverdes y en colores oscuros posibilitan iniciar la fotosíntesis de inmediato y absorber más calor. Las adaptaciones al incendio incluyen cortezas gruesas y en el caso de las piñas de las coníferas estas se abren con el calor dispersando las semillas por los suelos libres de competencia y garantizando la supervivencia de la especie (Walter, 1977) (Alcaraz *et al.,* 1999) (Codron, 2011).

4.3.3 Adaptaciones climas fríos

A lo largo de las descripciones previas de la tundra y la taiga se han visto diferentes mecanismos y estrategias de adaptación que las plantas han desarrollado para hacer frente a los factores de frío, déficit hídrico y falta de luz en invierno. A continuación se resumen de una forma general, las adaptaciones de las hojas más representativas de los climas fríos:

- **Adaptaciones morfológicas:** Reducción del tamaño en las plantas, normalmente de crecimiento rastrero que les permite resistir el viento, manteniendo la humedad y la temperatura interior, además de quedar totalmente recubiertas por la nieve que actúa como aislante térmico. En lo que a las hojas se refiere también se produce una reducción del tamaño, resultando hojas pequeñas y de formas aciculares para evitar una excesiva pérdida de agua y congelación, y generalmente en colores oscuros, para captar más luz. Superficie foliar cubierta de ceras, para disminuir la permeabilidad de la hoja y reflejar los rayos sol; o de pelos para retener la humedad y el calor. Reducción del número de estomas y estos se encuentran protegidos en espacios sin turbulencias de aire para disminuir la evaporación.

- **Adaptaciones xeromórficas:** son adaptaciones asociadas a los climas cálidos y áridos, pero que también proporcionan ventajas a las plantas de las zonas frías, que debido a la congelación del suelo no pueden absorber el agua y sufren riesgo de deshidratación. Este tipo de adaptación incluye, por ejemplo, hojas pequeñas, cutículas cerosas o plantas suculentas, que tienen por objetivo reducir las pérdidas de agua por transpiración.

· **Adaptaciones alta montaña:** son adaptaciones características de regiones frías que presentan las plantas de alta montaña, que pese a no pertenecer en sentido estricto a ese tipo de climas, comparten condiciones de bajas temperaturas, exposición intensa al viento y a la radiación ultravioleta que tiende a incrementarse con la altura, además de una variable disponibilidad de agua.

· **Adaptaciones al fuego:** piñas de las coníferas que se abren en respuesta al aumento de temperatura, como mecanismo de dispersión de las semillas.

4.4 Exploración información biofísica

4.4.1 Parámetros ambientales

Previamente se ha descrito cómo las bajas temperaturas, el déficit hídrico y la falta de luz durante el invierno son los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas fríos. A continuación de describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente dichas plantas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono (Figura 4.6):

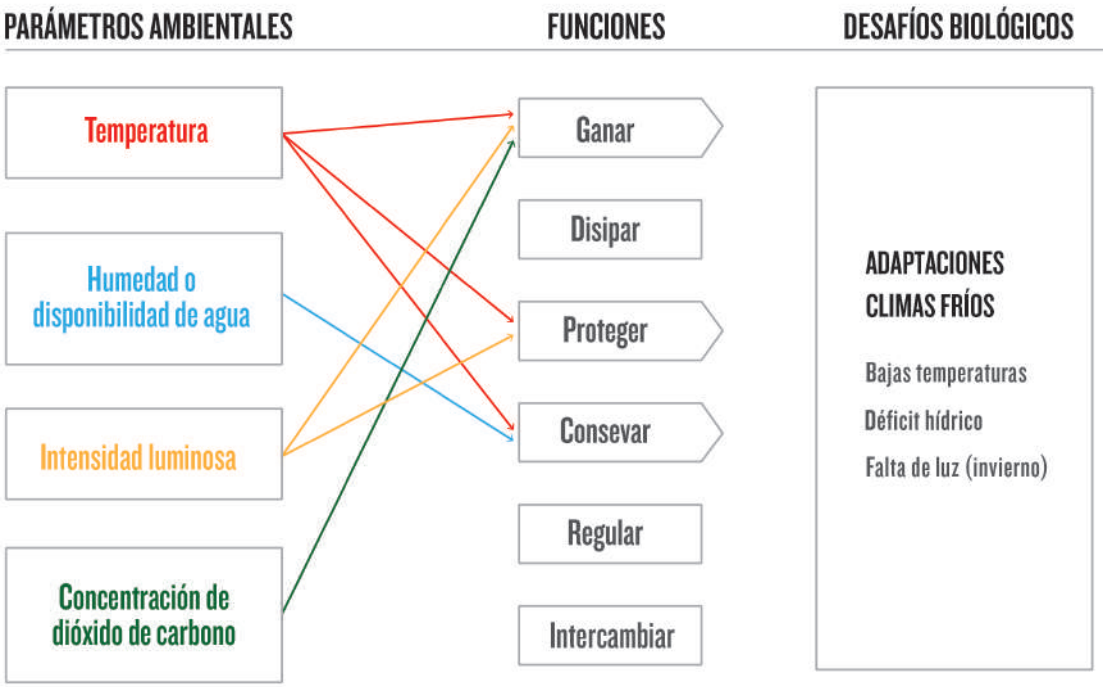


Figura 4.6
Diagrama de funciones identificadas para cada parámetro ambiental que resultarán en las diversas estrategias de adaptación de las plantas de climas fríos.

- **Temperatura:** las funciones vitales vegetales dependen de intercambios continuos con el exterior y al no disponer de sistemas eficaces para regular su temperatura interna, no pueden evitar el enfriamiento. Además, la eficacia de la fotosíntesis depende de la temperatura ambiental y se va reduciendo según lo hace el calor, hasta quedar bloqueada por debajo de un determinado umbral. Aunque las plantas son capaces de adaptarse excepcionalmente a las temperaturas predominantes en el entorno, pues las plantas que crecen en áreas frías son capaces de incorporar dióxido de carbono a temperaturas cercanas a los 0ºC (Taiz & Zeiger, 2007), los mecanismos y estrategias de adaptación para ganar y conservar calor serán determinantes para soportar mejor la dureza de los inviernos y con ello la supervivencia de las especies.

- **Humedad:** en las regiones más septentrionales, debido a la persistencia de las temperaturas bajo cero, el agua permanece congelada durante gran parte del tiempo, lo que implica que no pueda ser absorbido por las plantas, que sumado al efecto desecante de los fuertes vientos produce déficit hídrico. En las regiones más meridionales el balance hídrico mejora, y aunque las precipitaciones son moderadas, las tasas de evaporación son reducidas y los veranos relativamente húmedos, los mecanismos y estrategias de adaptación para conservar la máxima cantidad de agua absorbida serán clave para el desarrollo de las especies.

- **Luz:** en los climas fríos, debido a la latitud, la falta de luz durante las largas noches polares impide la fotosíntesis y obliga a los vegetales a paralizar su actividad durante periodos muy prolongados. En regiones más meridionales la luz sigue siendo un problema, pues existe una gran oscilación de horas de sol diarias entre las diferentes épocas del año, desde cinco horas en invierno hasta 18 en verano, además que en las zonas de alta montaña la exposición a la radiación ultravioleta se incrementan con la altura, por ello serán vitales los mecanismos y estrategias de adaptación para reflejar o absorber la radiación solar discontinua.

- **Dióxido de carbono:** en las regiones de latitudes más altas el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera es menor que en otras regiones terrestres, con una concentración de 0,016% frente a 0,03% como valor normal. Debido a esta baja concentración, se desarrollan mecanismos de adaptación para captar y conservar el dióxido de carbono, como la captación del suelo para la mayor parte usado en la fotosíntesis.

4.4.2 Modelos biológicos

La exploración de modelos biológicos es la búsqueda y análisis de ejemplos de adaptación de las plantas a los climas fríos, a través de la biomecánica y morfología funcional de la superficie de sus hojas. Dicha exploración se organiza según los conceptos de desafío, función y estrategia ya explicados en el capítulo 3. Para cada parámetro ambiental se identifican diversas funciones, de las cuales resultarán la estrategias de adaptación de las plantas a su entorno. Es importante destacar la multifuncionalidad de las superficies de las hojas (Gibson, 2012) (Bhushan, 2009), lo que quiere decir que cada planta desarrolla varias y simultáneas estrategias de adaptación a su entorno y que a su vez una misma estrategia puede desempeñar diferentes funciones que hagan frente a diferentes desafíos a los que tiene que hace frente la planta.

A continuación se desarrolla la exploración de los modelos biológicos organizada de acuerdo a tres niveles (Figura 4.7).

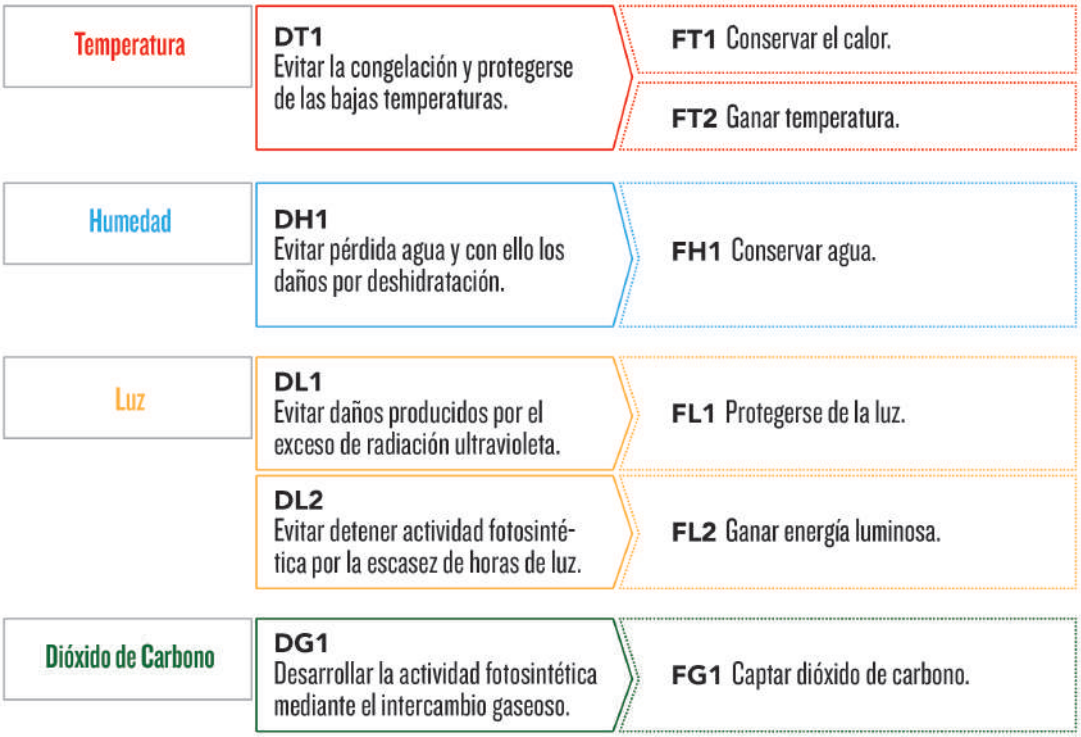


Figura 4.7
Diagrama de la exploración de estrategias de adaptación de los modelos biológicos según parámetro ambiental, desafío y función.

- **Nivel 1:** este primer nivel define el parámetro ambiental temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

- **Nivel 2:** este segundo nivel identifica los desafíos o retos a los que tiene que hacer frente la planta. Desafíos identificados: evitar la congelación y protegerse de las bajas temperaturas; evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación; evitar daños producidos por el exceso de radiación ultravioleta; evitar detener actividad fotosintética por la escasez de horas de luz; y desarrollar la actividad fotosintética mediante el intercambio gaseoso.

- **Nivel 3:** el tercer nivel distingue las diferentes funciones que definen directamente el desafío biológico al que hacer frente. Funciones definidas: conservar el calor; ganar temperatura; conservar el agua; protegerse de la luz; ganar energía luminosa y captar dióxido de carbono.

Finalmente, cada una de las funciones definidas resultan en una o varias estrategias biológicas, como la forma en la que las hojas se han adaptado al medio frío dando respuesta a los desafíos funcionales. A continuación se expone la exploración de los modelos biológicos realizada:

4.4.2.1 Temperatura

DESAFÍO DT1:	>	FUNCIÓN FT1:
Evitar la congelación y protegerse de las bajas temperaturas		Conservar el calor

Estrategia: pubescencia foliar para disminuir el enfriamiento

Modelo biológico: *Salix arctica, Saussurea alpina, Ledum palustre, Leontopodium alpinum*

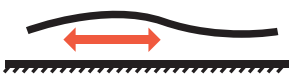
Figura 4.8 *Salix arctica.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: reducción tamaño foliar

Modelo biológico: *Koenigia islandica, Ledum palustre, Betula nana, Salix herbacea, Juniperus communis, Pinus sylvestris*

Figura 4.9 *Betula nana.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: crecimiento de porte rastrero



Modelo biológico: *Vaccinium vitis-idaea, Arctostaphylos uva-ursi*

Figura 4.10 *Arctostaphylos uva-ursi.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas perennes aciculares

Modelo biológico: *Pinus sylvestris, Picea abies, Juniperus communis*

Figura 4.11 *Juniperus communis.*
Fuente: elaboración propia.

DESAFÍO DT1:	>	**FUNCIÓN FT2:**
Evitar la congelación y protegerse de las bajas temperaturas		Ganar temperatura

Estrategia: colores oscuros (rojo)

Modelo biológico: *Vaccinium vitis-idaea, Empetrum nigrum, Koenigia islandica, Arctostaphylos alpina, Sphagnum capillifolium*

Figura 4.12 *Arctostaphylos alpina.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: crecimiento en densas almohadilladas, manteniendo una temperatura y un microclima interior más cálido

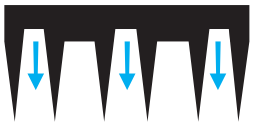
Modelo biológico: *Silene acaulis*

Figura 4.13 *Silene acaulis.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

4.4.2.2 Humedad

DESAFÍO DH1:	>	FUNCIÓN FH1:
Evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación		Conservar el agua

Estrategia: pubescencia foliar para reducir las pérdidas de agua por transpiración



Modelo biológico:*Salix arctica, Saussurea alpina, Ledum palustre, Leontopodium alpinum*

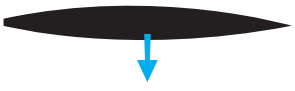
Figura 4.14 *Saussurea alpina.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas suculentas como sistema de almacenamiento agua

Modelo biológico: *Rhodiola rosea*

Figura 4.15 *Rhodiola rosea.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

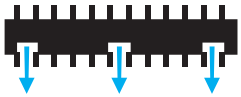
Estrategia: hojas aciculares perennes para reducir las pérdidas de agua por transpiración



Modelo biológico: *Pinus sylvestris, Picea abies, Juniperus communis*

Figura 4.16 *Pinus sylvestris.*
Fuente: elaboración propia.

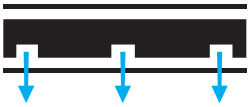
Estrategia: superficie cerosa para disminuir la permeabilidad



Modelo biológico: *Koenigia islandica, Salix herbacea, Pinus sylvestris*

Figura 4.17 *Salix herbacea.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas coriáceas para disminuir la permeabilidad



Modelo biológico: *Salix arctica, Empetrum nigrum, Arctostaphylos uva-ursi, Koenigia islandica*

Figura 4.18 *Arctostaphylos uva-ursi.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: reducción densidad estomática para disminuir la permeabilidad

Modelo biológico: *Pinus sylvestris*

Figura 4.19 *Pinus sylvestris.* Fuente: elaboración propia.

Estrategia: estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración

Modelo biológico: *Pinus sylvestris*

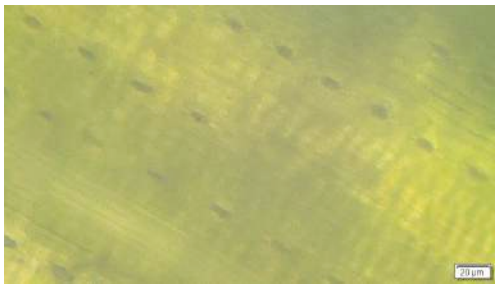


Figura 4.20 *Pinus sylvestris.*
Fuente: elaboración propia.

4.4.2.3 Luz

DESAFÍO DL1:	>	FUNCIÓN FL1:
Evitar daños producidos por el exceso de radiación ultravioleta		Protegerse de la luz

Estrategia: pubescencia foliar para reflejar radiación ultravioleta

Modelo biológico: *Leontopodium alpinum*

Figura 4.21 *Leontopodium alpinum.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: superficie cerosa para reflejar radiación ultravioleta

Modelo biológico: *Pinus sylvestris, Picea abies*

Figura 4.22 *Picea abies.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DL2:	>	FUNCIÓN FL2:
Evitar detener actividad fotosintética por la escasez de horas de luz.		Ganar energía luminosa

Estrategia: colores oscuros y rojo para absorber radiación solar

Modelo biológico: *Vaccinium vitis-idaea, Empetrum nigrum, Koenigia islandica, Arctostaphylos alpina, Sphagnum capillifolium*

Figura 4.23 *Sphagnum capillifolium.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

4.4.2.4 Dióxido de carbono

DESAFÍO DG1:	>	FUNCIÓN FG1:
Desarrollar la actividad fotosintética mediante el intercambio gaseoso		Captar dióxido de carbono

Estrategia: apertura estomática

Modelo biológico: cualquiera de las citadas previamente

Figura 4.24 *Saussurea alpina.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

4.5 Clasificación de datos

Una vez realizada la exploración de los modelos naturales pertenecientes a los climas fríos, macrobioclimas polar y boreal, se elabora una recopilación de datos de los ejemplos biológicos explorados, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas (López *et al.,* 2017). A continuación se presenta la clasificación que ordena los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones frías según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

4.5.1 Mecanismos dinámicos

Se consideran mecanismos dinámicos (MD) aquellas adaptaciones que responden a estímulos externos a través del movimiento, esto es, mecanismos biológicos que exhiben movimientos rápidos y reactivos en una escala de tiempo que podemos percibir, como respuesta a cambios en el medio circundante. En la Figura 4.25 se recogen los mecanismos explorados en las hojas de plantas de climas fríos, con adaptaciones a las bajas temperaturas, el déficit hídrico y la falta de luz durante el invierno. La abstracción de los mecanismos dinámicos encontrados de interés darán lugar al funcionamiento adaptativo dinámico en la envolvente de climas fríos, a través de su tectónica para reaccionar y mutar ante los estímulos exteriores que la solicitan.

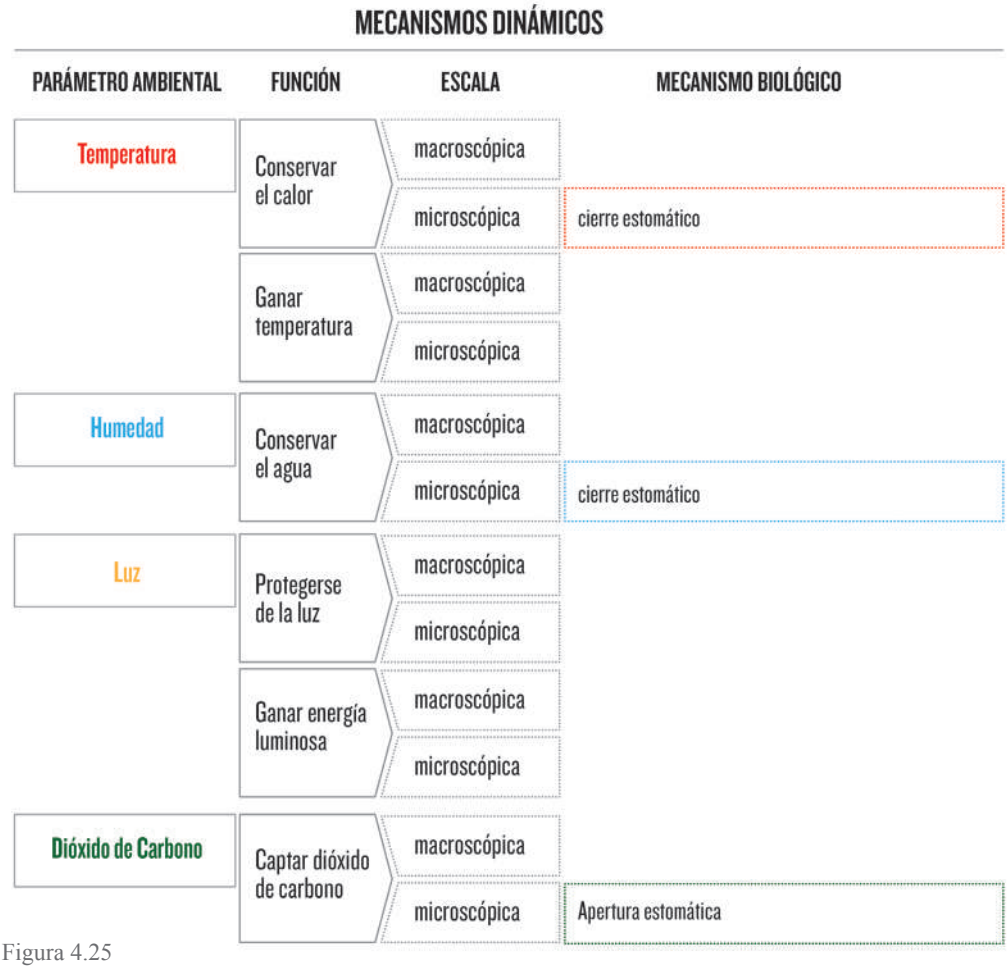


Figura 4.25
Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas fríos.

4.5.2 Estrategias estáticas

Se consideran estrategias estáticas (EE) aquellas morfologías que las superficies de las hojas han desarrollado como consecuencia directa de las adaptaciones funcionales a las condiciones ambientales (Koch *et al.,* 2009). En la Figura 4.26 se recogen las estrategias estáticas exploradas en las hojas de plantas de climas fríos, con adaptaciones a las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz. La abstracción de las estrategias estáticas encontradas de interés darán lugar al funcionamiento adaptativo estático en la envolvente de climas fríos y definirán su diseño adaptativo, a través de la tectónica y la generación de patrones que definan las características morfológicas.

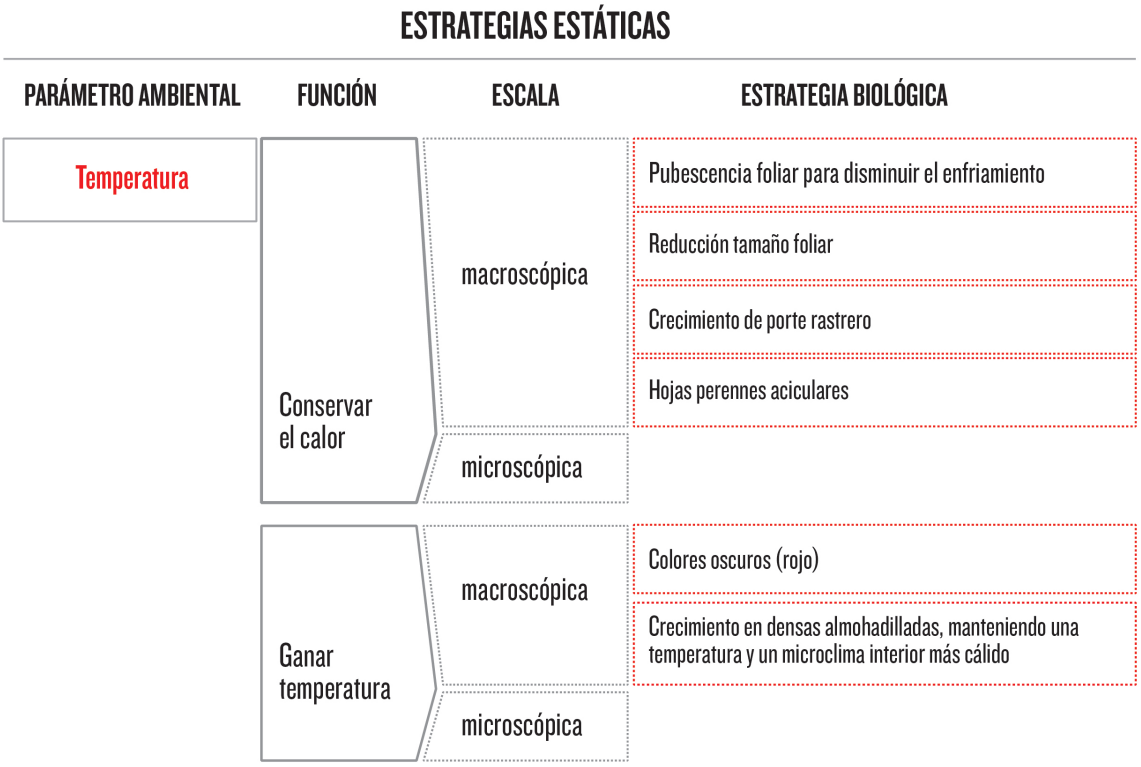


Figura 4.26-A
Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas fríos. (Temperatura)

Figura 4.26-B
Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas fríos. (Humedad, luz y dióxido de carbono)

4.6 Estomas

4.6.1 Valoración

Una vez categorizados diversos ejemplos de adaptación de las hojas de las plantas para una posible aplicación a envolventes arquitectónicas, se han seleccionado los estomas como organismos de especial interés. La exploración de modelos biológicos ha resultado en una clasificación de los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, donde los estomas toman un protagonismo relevante siendo de especial interés en el proceso de inspiración biomimética. A continuación se sintetiza la presencia de los estomas en la clasificación desarrollada previamente para climas fríos:

Estomas como mecanismos dinámicos (MD):

· Función FT1: conservar el calor
· MD: cierre estomático

· Función FH1: conservar el agua
· MD: cierre estomático para disminuir la permeabilidad

· Función FG1: captar dióxido de carbono
· MD: apertura estomática

Estomas como estrategias estáticas (EE):

· Función FT1: conservar el calor
· EE: pubescencia foliar protegiendo estomas

· Función FH1: conservar el agua
· EE: pubescencia foliar protegiendo estomas y reducir así las pérdidas de agua por transpiración
· EE: ceras protegiendo estomas como impermeabilización foliar
· EE: reducción densidad estomática para disminuir la permeabilidad
· EE: estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración

· Función FL1: protegerse de la luz
· EE: pubescencia foliar para reflejar radiación ultravioleta
· EE: superficie cerosa para reflejar radiación ultravioleta

En los siguientes puntos se muestra un estudio de los estomas en los climas fríos a través de diversas plantas representativas, con el objetivo de profundizar en el detalle de su funcionamiento y sus sistemas estructurales para poder transferirlos a la envolvente arquitectónica mediante el funcionamiento adaptativo dinámico y estático (tectónica) y la definición de su diseño adaptativo (características morfológicas).

4.6.2 Estomas como mecanismos dinámicos

En el capítulo 3 se ha introducido brevemente el funcionamiento de los movimientos de apertura y cierre estomáticos como mecanismos dinámicos de adaptación. En este capítulo, dedicado a los climas fríos, se han enumerado diferentes adaptaciones de las plantas para hacer frente a las bajas temperaturas, el déficit hídrico y la falta de luz durante el invierno, a través de modificaciones estomáticas. Bajo condiciones limitantes, las plantas disponen de mecanismos capaces de regular la apertura estomática (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Aunque las plantas de climas fríos han desarrollado adaptaciones para mejorar la resistencia al frío, el déficit hídrico, la escasez de luz o el viento, estos factores afectan a la tasa de transpiración, reduciendo la intensidad de respiración (Taiz & Zeiger, 2007) y por consiguiente a los mecanismos de apertura y cierre estomáticos (Figura 4.27).

La escasez de agua, causada por el permafrost que cubre el suelo casi todo el año, sumado a las escasas precipitaciones, provocan una situación de estrés por déficit hídrico en las plantas. Esto puede provocar el cierre de los estomas en tiempos muy cortos, debido a la incapacidad de mantener la presión de turgencia. De la misma forma, se establece una relación entre el viento y el cierre estomático, desencadenado por la pérdida de agua a través de las hojas. Los vientos fuertes y secos se llevan el vapor de agua de las superficies de las hojas, incrementando la evaporación. Esto desencadena adaptaciones de protección de la acción del viento para disminuir la tasa de transpiración, estabilizando la capa colindante de aire sobre la superficie de la hoja. Algunas de estas adaptaciones ya se han estudiado previamente como la cubrición de pelos o ceras sobre la superficie foliar, o las formas de crecimiento de las plantas con formas en densas almohadillas o de porte rastrero. Además de estas estrategias, las corrientes de aire también afectan a los mecanismos de apertura y cierre estomáticos, debido a los cambios que la acción del viento produce en el entorno atmosférico. La bajada de temperaturas, de humedad relativa, y de la irradiación provocadas en el entorno aumentan las posibilidades de desecación, facilitando la salida de agua (Martin & Donkin, 1983) (Raven *et al.,* 1992) (Willmer & Fricker, 1996) (Vogel, 2012). Y por ello, los fríos y secos vientos típicos de los climas fríos pueden causar el cierre estomático como mecanismo para limitar la evaporación y evitar daños por deshidratación.

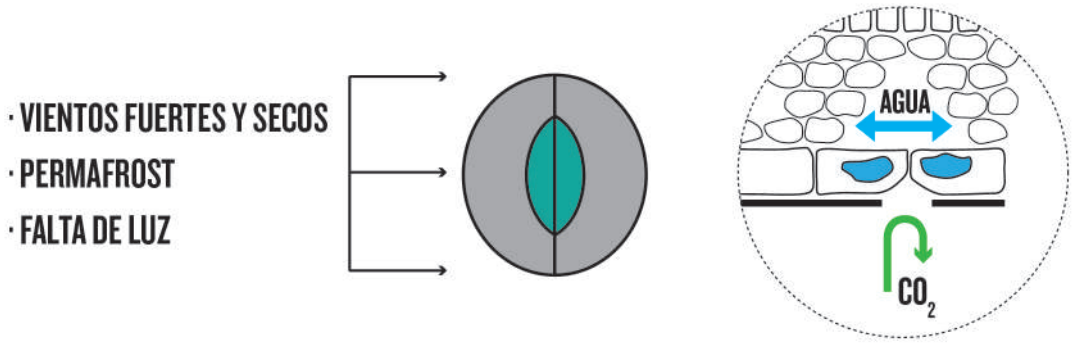


Figura 4.27
Cierre estomático en plantas de climas fríos.

Otros parámetros ambientales como la luz afectan también a los movimientos de apertura y cierre estomáticos. En la mayoría de las especies los estomas se abren con la luz y se cierran en la oscuridad. La luz puede tener un efecto más directo, que la utilización fotosintética del dióxido de carbono durante el día, sobre los estomas (Martin & Donkin, 1983) (Raven *et al.,* 1992) (Willmer & Fricker, 1996) (Vogel, 2012). Por tanto, dado que la luz puede estimular la apertura estomática independientemente del dióxido de carbono, en los climas fríos este parámetro ejerce influencia sobre los movimientos estomáticos. Debido a la latitud de las regiones frías, la falta de luz durante las largas noches polares provoca el cierre estomático, impidiendo así la fotosíntesis y obligando a los vegetales a paralizar su actividad durante periodos muy prolongados.

4.6.3 Estomas como estrategias estáticas

4.6.3.1 Materiales y métodos

Para el estudio presentado a continuación se examinaron las hojas de tres especies representativas de los climas fríos. Todas las muestras fueron tomadas en el Jardín Botánico Atlántico de Gijón, donde se retiró una selección de hojas para cada especie a estudiar, durante los meses de septiembre y octubre del año 2015. Las especies examinadas fueron: *Betula celtiberica, Pinus sylvestris y Juniperus communis* (Figura 4.28).

Figura 4.28
Betula celtiberica, Pinus sylvestris y *Juniperus communis* (en orden de izquierda a derecha).
Fuente: elaboración propia.

Las tareas de observación y obtención de datos se desarrollaron en los laboratorios de la Facultad de Biología de la Universidad de Oviedo, durante los meses de octubre y noviembre del año 2015. Para la observación y conteo estomático se utilizó el protocolo general para la preparación de tejidos comúnmente usado en laboratorio (Perés-Martínez *et al.,* 2004) (Toral *et al.,* 2010) (Reyes-López *et al.,* 2015), mediante cortes en cuadrados menores a 1 cm2 con raspado de la superficie para poder observar los estomas con claridad o incluso en algún especimen la extracción de la epidermis con pinzas. Tras estos preparativos se procedió a la colocación de la muestra sobre el portaobjetos, se añadió una gota de agua para su fijación y protegiéndolo con un cubreobjetos se observó al microscopio. Esta operación fue realizada dos veces para cada especie, para la observación de las superficies del haz y del envés de la hoja. El microscopio utilizado fue un microscopio modular manual con cámara digital integral modelo Olympus BX43 y el procesamiento de las imágenes obtenidas se llevó a cabo con el software Olympus CellSens.

4.6.3.2 Observación

El método de análisis consistió en la observación de la muestra aprovechando la gama de objetivos del microscopio: con el aumento de 10x se analizó el patrón de distribución y las estrategias anatómicas, con el aumento 20x se definió el patrón de densidad estomático y por último con el aumento 40x se midió y precisó la geometría de los estomas. A continuación se presentan los datos recogidos de cada especie observada:

MUESTRA 1

Especie: *Betula celtiberica*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 109mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 35 x 64 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observa la existencia de pelos, distribuidos sobre los nervios y en los bordes de la hoja.

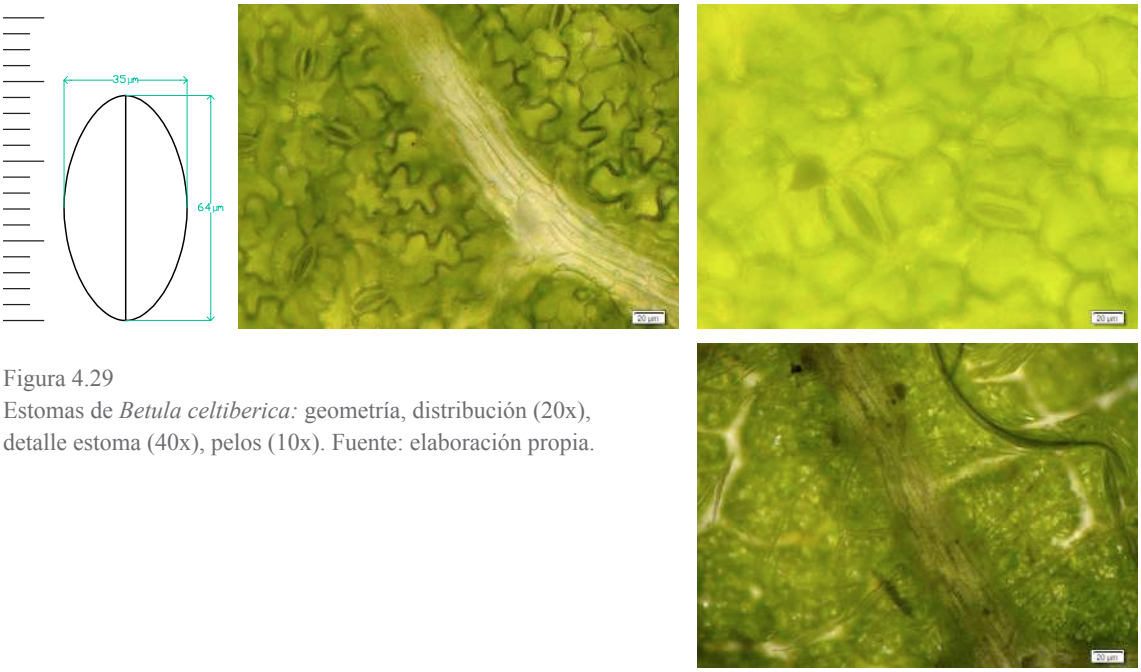


Figura 4.29
Estomas de *Betula celtiberica:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x), pelos (10x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 2

Especie: *Pinus sylvestris*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 70mm^{-2}
> Distribución: regular formando patrón lineal
> Geometría: 60 x 86 µm

Estrategias anatómicas (3D): superficie cerosa y estomas hundidos.

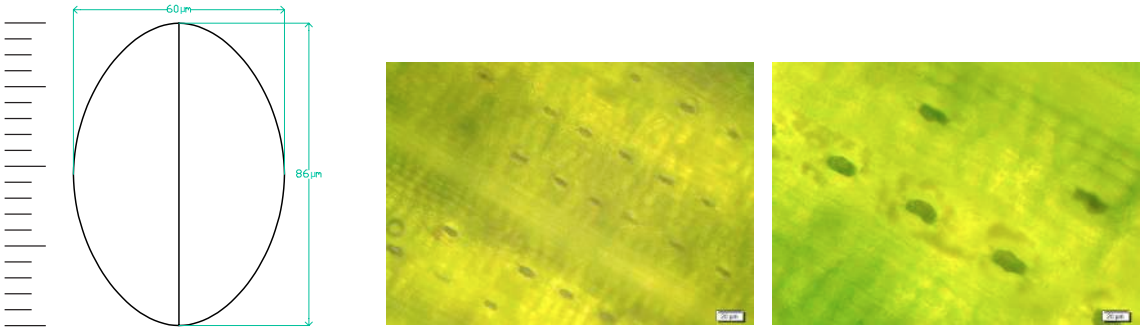


Figura 4.30
Estomas de *Pinus sylvestris:* geometría, distribución (10x), distribución (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 3

Especie: *Juniperus communis*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 200mm^{-2}
> Distribución: regular formando patrón lineal
> Geometría: 52 x 70 µm

Estrategias anatómicas (3D): superficie cerosa.

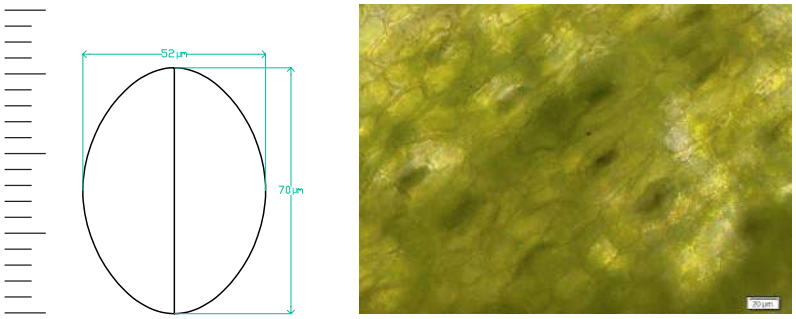


Figura 4.31
Estomas de *Juniperus communis:* geometría, distribución (20x). Fuente: elaboración propia.

4.7 La envolvente en climas fríos

4.7.1 Parámetros ambientales

Previamente se ha descrito cómo las bajas temperaturas, el déficit hídrico y la falta de luz durante el invierno son los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas fríos. A continuación de describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de climas fríos, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono (Figura 4.32):

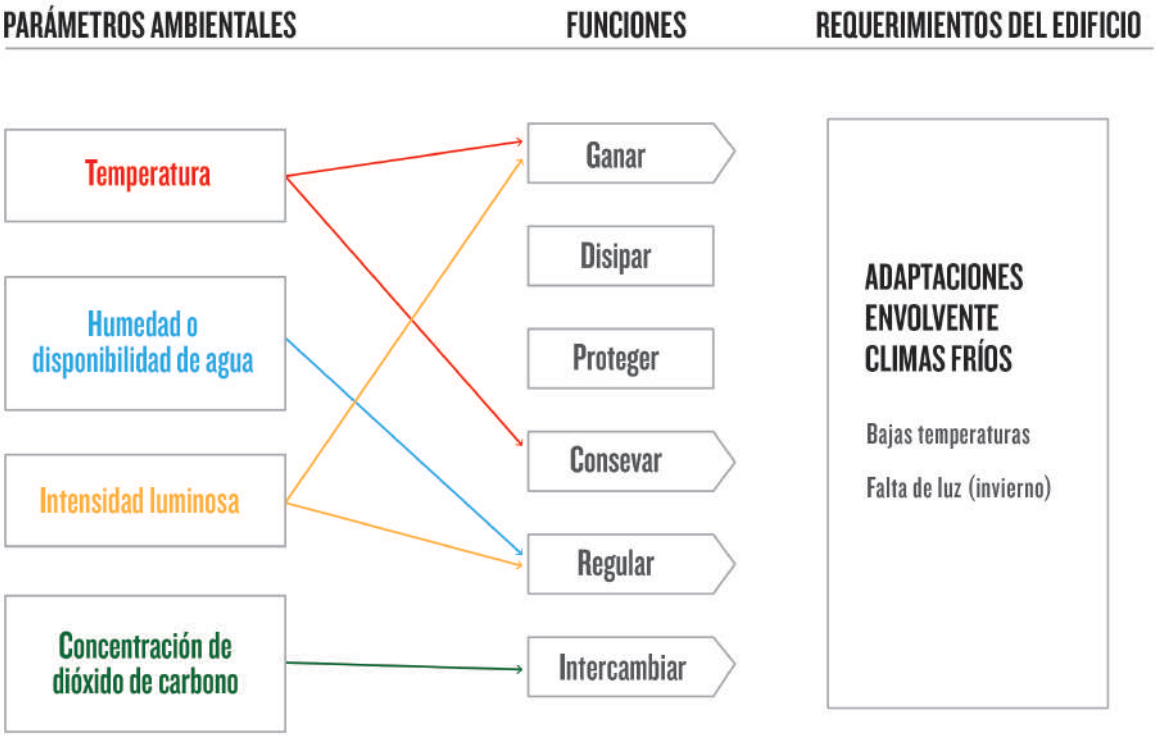


Figura 4.32
Diagrama de los desafíos de las envolventes de las regiones frías, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

· **Temperatura:** en el capítulo 2 se ha explicado la relación de la envolvente con el parámetro ambiental temperatura a través del confort térmico. Tomando como referencia los documentos de los reglamentos estándar como los del CTE, RITE ó los creados por la ASHRAE, la temperatura recomendada en el interior de los edificios se estima en torno a los 20-23ºC en invierno y los 22-27ºC en verano. De acuerdo a los diagramas climáticos adjuntados al comienzo del presente capítulo, se pueden comprobar las bajas temperaturas registradas en las regiones de climas fríos, siendo la temperatura media de las mínimas del mes más frío del año de -12,9 ºC en Sletnes, Noruega, -12,8 ºC en Kuopio, Finlandia o -15,6 ºC en Yuryevets, Rusia, por ejemplo. Por tanto, teniendo en cuenta las solicitaciones exteriores sobre el edificio, se preven necesarias diferentes estrategias de adaptación a las bajas temperaturas y la escasa incidencia solar, con el objetivo de lograr y mantener los niveles de confort térmico en los espacios habitables.

· **Humedad:** de acuerdo con el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016), las condiciones interiores de humedad relativa se establecen entre los valores 45-60% en verano y 40-50% en invierno. En las regiones de climas fríos las precipitaciones en general son escasas, produciéndose la mayor parte en verano, sin embargo no existe aridez debido a que las bajas temperaturas mantienen la humedad relativa alta, lo que resulta en un tipo de ambiente siempre húmedo en la mayor parte de los lugares. Por tanto, la envolvente de climas fríos desarrollará estrategias de adaptación de acuerdo a los niveles de humedad relativa con el objetivo de regular la calidad del aire interior.

· **Luz:** la luz solar tiene influencia directa en el comportamiento lumínico y térmico del edificio, y en consecuencia sobre las demandas para alcanzar los respectivos niveles de confort. En los climas fríos la escasa radiación solar, especialmente durante los meses de invierno, supone un desafío para la envolvente como reguladora del confort lumínico interior, el cual se deberá resolver mediante estrategias de adaptación para captar y absorber la luz, evitando el conflicto entre la ganancia lumínica y el posible deslumbramiento en el interior.

· **Dióxido de carbono:** en el capítulo 2 se ha explicado la relación de la envolvente con el parámetro ambiental dióxido de carbono a través de la calidad del aire interior. De acuerdo a las recomendaciones para satisfacer las condiciones de bienestar en el edificio recogidas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016) se establecen unos valores para el dióxido de carbono de entre 500 y 800 ppm (partes por millón). Tal y como exige el Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (DB-HS, 2016) se dispondrán medios para ventilar los espacios interiores adecuadamente eliminando los contaminantes habituales producidos durante el uso normal de los edificio. En las regiones de climas fríos, el desafío para la envolvente será proporcionar una adecuada calidad del aire interior mediante estrategias de adaptación para ventilar, evitando el conflicto entre el intercambio de aire con el exterior y las posibles pérdidas de calor.

4.7.2 Adaptabilidad

En las regiones de climas fríos, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a las condiciones de bajas temperaturas y escasez de luz durante el invierno mediante estrategias de captación de la radiación solar, conservación del calor en el interior y ventilación para mantener la calidad del aire interior. En el siguiente diagrama (Figura 4.33) se sintetizan los procesos a desarrollar por la envolvente de acuerdo a las funciones definidas para hacer frente a los desafíos de las regiones de climas fríos.

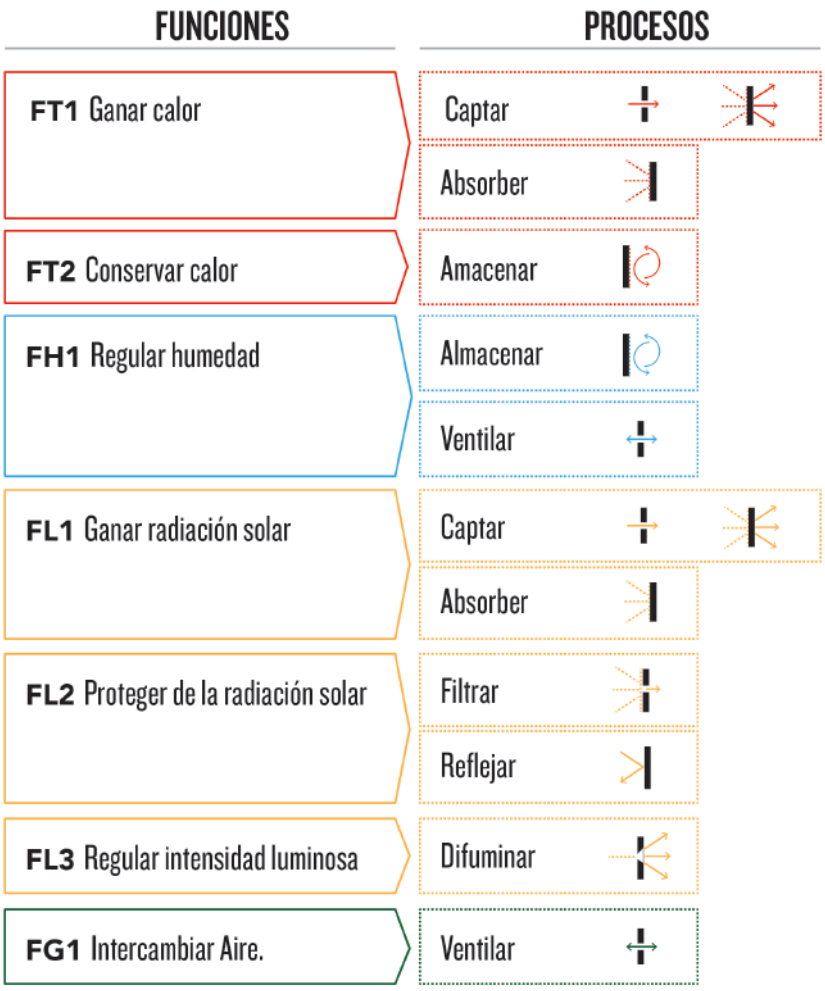


Figura 4.33
Diagrama de las funciones a desarrollar por la envolvente de acuerdo a los desafíos definidos en las regiones de climas fríos.

4.7.3 Soluciones existentes

La mayoría de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en los climas fríos, se resuelven mediante materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para calentar la temperatura ambiente. Las soluciones comunes para hacer frente a las bajas temperaturas exteriores y lograr el confort térmico interior consisten en sistemas de calentamiento del aire, mediante radiadores; sistemas de calefacción por suelo radiante; convectores de emisión de calor por convección; o sistemas de aire acondicionado (Bilow, 2012). Normalmente estos aparatos térmicos se fijan a las paredes, o se acoplan en los techos o suelos de las estancias, ocupando grandes superficies de espacio, además de las salas destinadas a la combustión para la generación de calor (Figura 4.34). Asimismo, el uso de este tipo de instalaciones contribuye al aumento de la demanda energética en los edificios (Knaack *et al.,* 2007). Por otra parte, para la conservación de las ganancias térmicas interiores, la envolvente es considerada como una barrera térmica que debe evitar la pérdida de calor mediante el aislamiento, lo cual mejora la hermeticidad del aire, reduciendo el calentamiento necesario y contribuyendo así a una disminución en el consumo de energía. Sin embargo, los materiales aislantes actúan como una barrera entre el ambiente exterior y los espacios interiores, reduciendo la calidad del aire interior y disminuyendo la satisfacción de los ocupantes (Taylor & Imbabi, 1998).

Figura 4.34
Radiador fijado a la pared y sala de calderas. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Esto sugiere, que a pesar del requerimiento de mantener el calor, la infiltración de aire a través de la envolvente es importante para lograr la calidad del aire interior. Por todo ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas frías definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas. En los próximos apartados se darán las claves para la transferencia de los principios biológicos a los requerimientos constructivos mediante la generación de diseños conceptuales de envolvente para climas fríos.

Haciendo un repaso de la metodología "De las plantas a la arquitectura" (Figura 4.35), se aprecia cómo a lo largo del capítulo se ha completado la Fase 1-Biología, y de la Fase 2-Transición se ha ido desarrollando la sub-fase "Abstracción" y la sub-fase "Valoración". Respecto a esta última, durante este apartado (4.7.2-La envolvente en climas fríos), se han descrito los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de climas fríos, de acuerdo a los diferentes parámetros ambientales y se han sintetizado los procesos a desarrollar por la envolvente. También, se ha hecho un repaso de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en dichas zonas. En el próximo apartado (4.8 Generación diseños conceptuales) se darán las pautas para transferir los principios biológicos extraídos de las plantas a los requerimientos constructivos de la envolvente. Finalmente, en el apartado 4.9 se abordará la Fase 3-Arquitectura, mediante el desarrollo de un caso de diseño teórico de envolvente para climas fríos.

Figura 4.35
Diagrama de flujo de la metodología "De las plantas a la arquitectura".

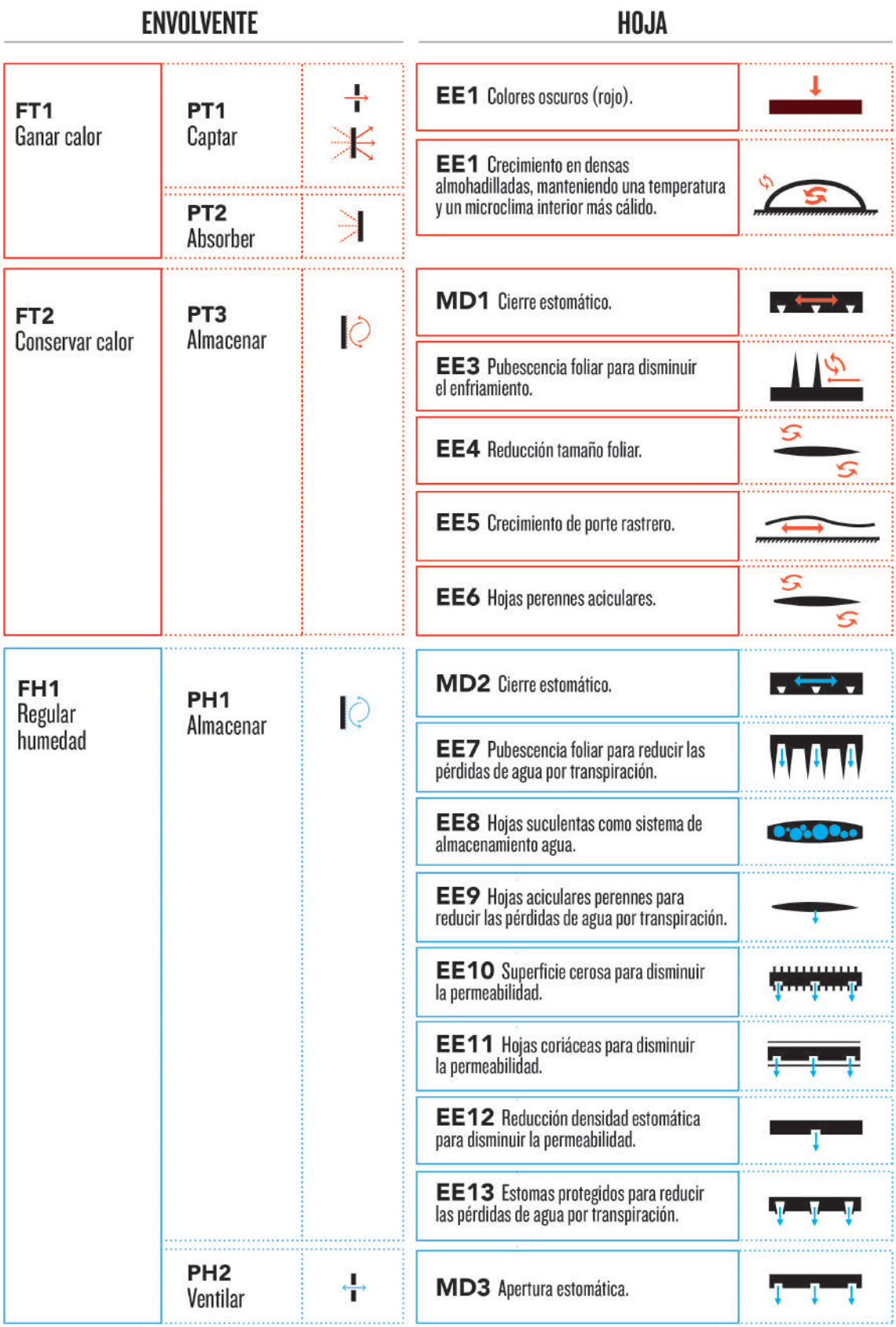


Figura 4.36-A
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas fríos. (Temperatura y humedad)

4.8 Generación de diseños conceptuales

4.8.1 Matriz de diseño

La generación de diseños conceptuales se aborda desde las seis funciones definidas que la envolvente de climas fríos tiene que desarrollar para hacer frente a los desafíos de bajas temperaturas y falta de luz durante el invierno. Las funciones (F) son: ganar y conservar el calor, regular la humedad, ganar o protegerse de la radiación solar, regular la intensidad luminosa e intercambiar aire con el exterior. Para cada función se presenta uno o más procesos (P) arquitectónicos a desarrollar por la envolvente para lograr la adaptabilidad al medio frío. Para los once procesos arquitectónicos expuestos se proponen diversos procesos biológicos de adaptación. La matriz de diseño resultante propone 4 mecanismos dinámicos (MD) y 16 estrategias estáticas (EE), haciendo un total de 20 posibles procesos biológicos como soluciones de aplicación. Dicha matriz se representa de forma visual en la Figura 4.36

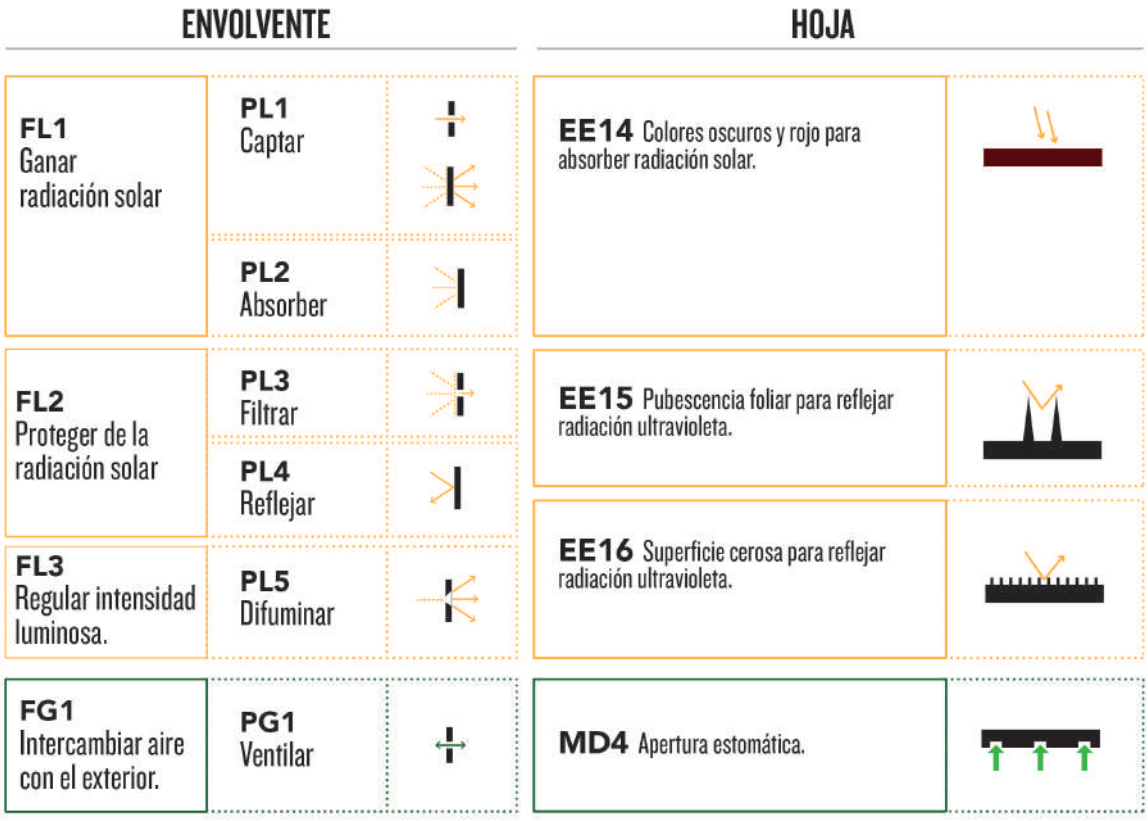


Figura 4.36-B
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas fríos. (Luz y dióxido de carbono)

4.8.2 Valoración del diseño conceptual

Para la generación del diseño conceptual de envolvente en climas fríos se abordan los desafíos de las bajas temperaturas y la falta de luz durante el invierno, mediante la selección de las funciones FT1 (ganar calor), FT2 (conservar calor), FH1 (regular la humedad), FL1 (ganar radiación solar) y FG1 (intercambiar aire con el exterior) en la matriz de diseño definida previamente. La matriz indica 3 mecanismos dinámicos y 12 estrategias estáticas relevantes para la generación del diseño conceptual:

Mecanismos dinámicos:

· MD1: cierre estomático para conservar el calor interno.
· MD2: cierre estomático para reducir las pérdidas de agua por transpiración.
· MD3: apertura estomática para intercambio gaseoso con el exterior.

Estrategias estáticas:

· EE1: crecimiento en densas almohadilladas para mantener una temperatura y un microclima interior más cálido.
· EE2: pubescencia foliar para disminuir el enfriamiento.
· EE3: reducción tamaño foliar y/o hojas perennes aciculares para evitar daños por congelación.
· EE4: crecimiento de porte rastrero para resistir al fuerte viento manteniendo la temperatura interior, además de quedar totalmente recubiertas por la nieve que actúa como aislante térmico.
· EE5: pubescencia foliar para reducir las pérdidas de agua por transpiración.
· EE6: hojas suculentas como sistema de almacenamiento agua.
· EE7: hojas aciculares perennes para reducir las pérdidas de agua por transpiración.
· EE8: superficie cerosa para disminuir la permeabilidad.
· EE9: hojas coriáceas para disminuir la permeabilidad.
· EE10: reducción densidad estomática para disminuir la permeabilidad.
· EE11: estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración
· EE12: colores oscuros, incluido rojo, para mayor absorción radiación solar.

Se propone, como ejemplo de envolvente en climas fríos, un caso de diseño que capte y conserve el calor permitiendo la ventilación mediante un sistema que minimize las pérdidas de calor. Para ello se seleccionan los siguientes MD y EE como características dominantes que proporcionan pautas para la generación de tal diseño conceptual:

· apertura estomática para intercambio gaseoso con el exterior.
· crecimiento en densas almohadilladas para mantener una temperatura y un microclima interior más cálido.
· crecimiento de porte rastrero para resistir al fuerte viento manteniendo la temperatura interior, además de quedar totalmente recubiertas por la nieve que actúa como aislante térmico.
· pubescencia foliar para disminuir el enfriamiento.
· estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración
· colores oscuros para mayor absorción radiación solar.

Tal y como se ha explicado en la Figura 4.35, una vez finalizada la Fase 2-Transición, el siguiente paso de la metodología "De las plantas a la arquitectura" es la implementación técnica, la cual se desarrolla en la Fase 3-Arquitectura. En el próximo apartado (4.9) se presenta un caso de diseño teórico, mediante la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos, con el objetivo de validar la metodología propuesta.

4.9 Caso de diseño 1

El caso de diseño supone el primer paso en la tarea de implementación técnica, y se aborda desde la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. La traducción gráfica abstracta incorpora la adaptabilidad de la envolvente por medio del funcionamiento adaptativo y del diseño adaptativo (Figura 4.37). En los próximos apartados se desarrollará cada uno de ellos.

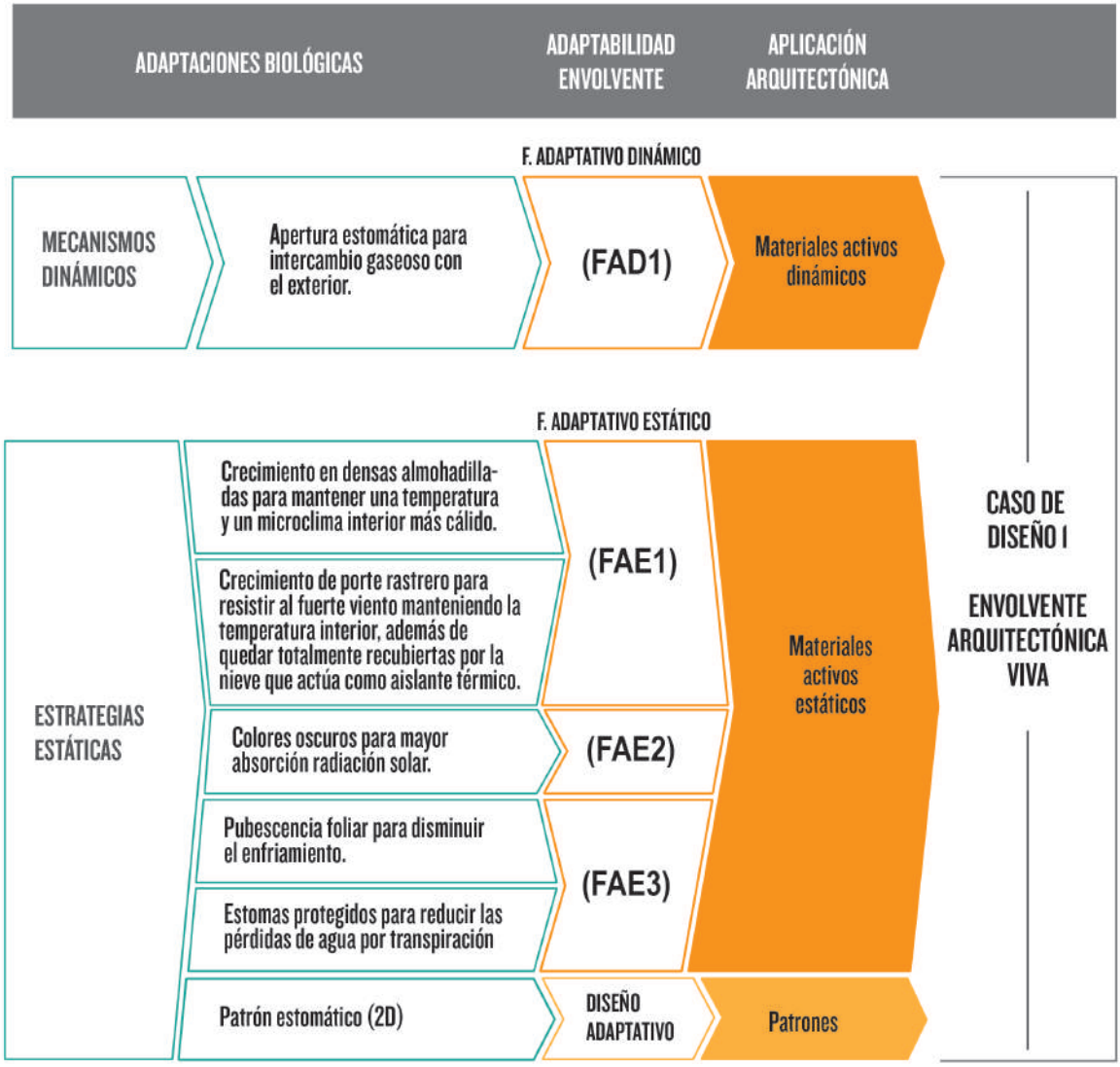


Figura 4.37
Diagrama de la adaptabilidad de la envolvente en el caso de diseño 1.

4.9.1 Funcionamiento adaptativo

El funcionamiento adaptativo de la envolvente se define como su capacidad de reaccionar y mutar ante los estímulos exteriores que la solicitan. Puede desarrollarse de una forma dinámica (FAD) o estática (FAE). En el "Caso de diseño 1" presentado, el mecanismo dinámico de apertura estomática se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo de ventilación. La combinación de este mecanismo con las estrategias estáticas de pubescencia foliar y estomas protegidos forman un sistema que permite la ventilación para lograr la calidad del aire interior minimizando las pérdidas de calor. Adicionalmente las otras tres estrategias estáticas seleccionadas, esto es, crecimientos en densas almohadillas y de porte rastrero y colores oscuros, se traducen gráficamente, y también de forma abstracta, en estrategias reactivas de captación de la radiación solar y conservación del calor generado. En la Figura 4.38 se muestra la representación gráfica abstracta del diseño conceptual. El diseño creado se descompone en tres adaptaciones que trabajan de forman conjunta para hacer frente mediante la adaptabilidad a los desafíos de bajas temperaturas y escasa radiación solar. A continuación se detalla cada una de ellas:

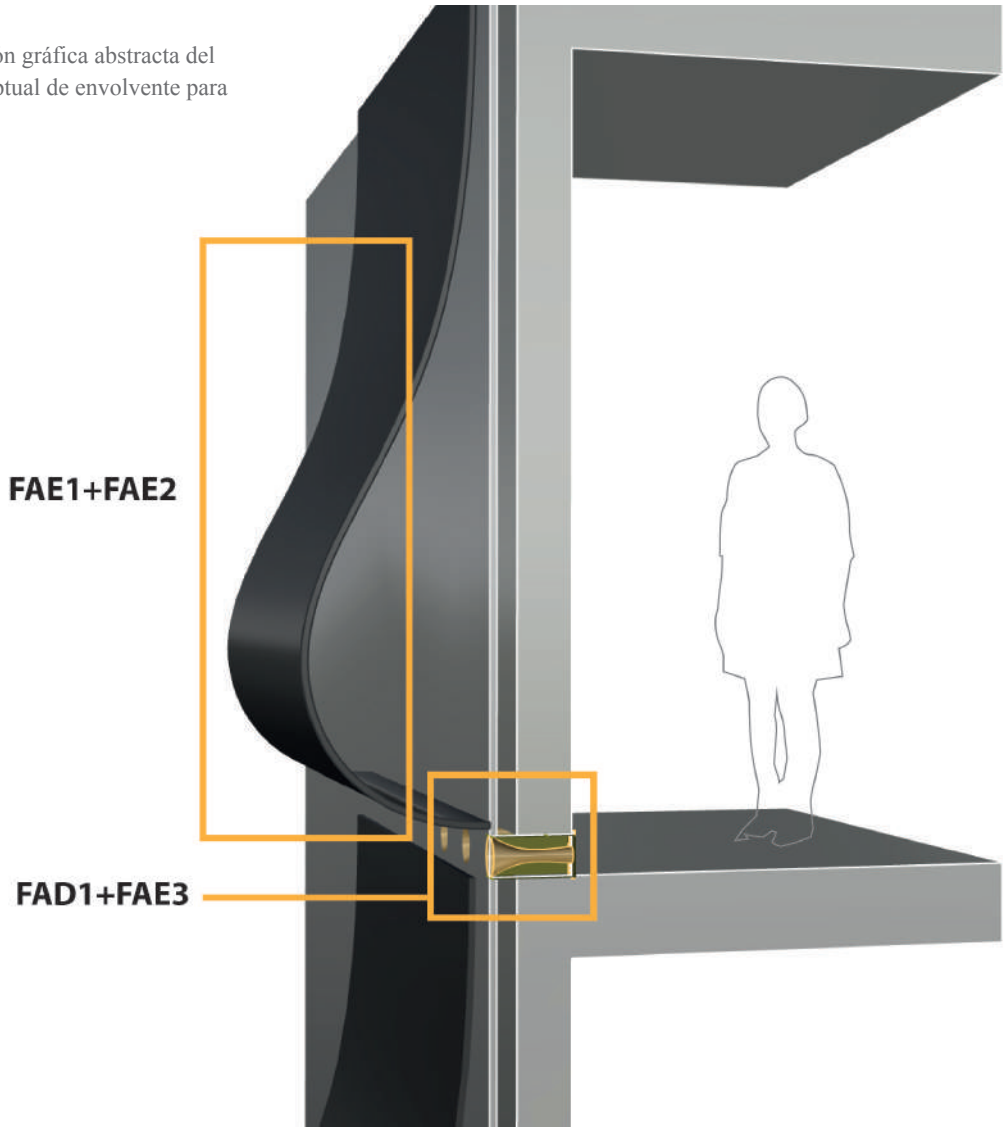


Figura 4.38
Representación gráfica abstracta del diseño conceptual de envolvente para climas fríos.

· **Sistema compuesto (FAE1) + (FAE2):**

· **Funcionamiento adaptativo estático 1 (FAE1):** en este caso, la adaptabilidad propuesta consiste en la protección de las bajas temperaturas externas, aumentando las ganancias térmicas en el interior y así reducir el consumo energético en sistemas de calefacción. Para ayudar a conservar la temperatura en el interior del edificio, se plantea la creación de una "burbuja" o espacio mediador entre la envolvente y el ambiente exterior, evitando un contacto directo entre ambos. Tomando como inspiración las formas de crecimiento en densas almohadillas o porte rastrero se genera este espacio, capaz de mantener una temperatura y un microclima más cálido. En las plantas, este tipo de morfología permite resistir los fuertes vientos manteniendo la temperatura interior, además de quedar totalmente recubiertas por la nieve que actúa como aislante térmico (Codron, 2011). La estrategia biológica de las morfologías de este tipo de crecimiento esférico se traduce gráficamente, y de forma abstracta, en la geometría de la sección de la envolvente mediante la creación de una malla con formas orgánicas abombadas (Figura 4.39). Estas mallas se colocarán sobre las zonas libre de acristalamiento en la envolvente, y estarán configuradas con colores oscuros para lograr una mayor absorción de la radiación solar (FAE2). Podría considerarse la posibilidad de generar unas morfologías que permitiesen además pequeñas acumulaciones de nieve. La retención de nieve sería una capa lo suficientemente fina para actuar como aislamiento térmico natural, y al mismo tiempo no suponer un exceso de sobrecarga en la envolvente.

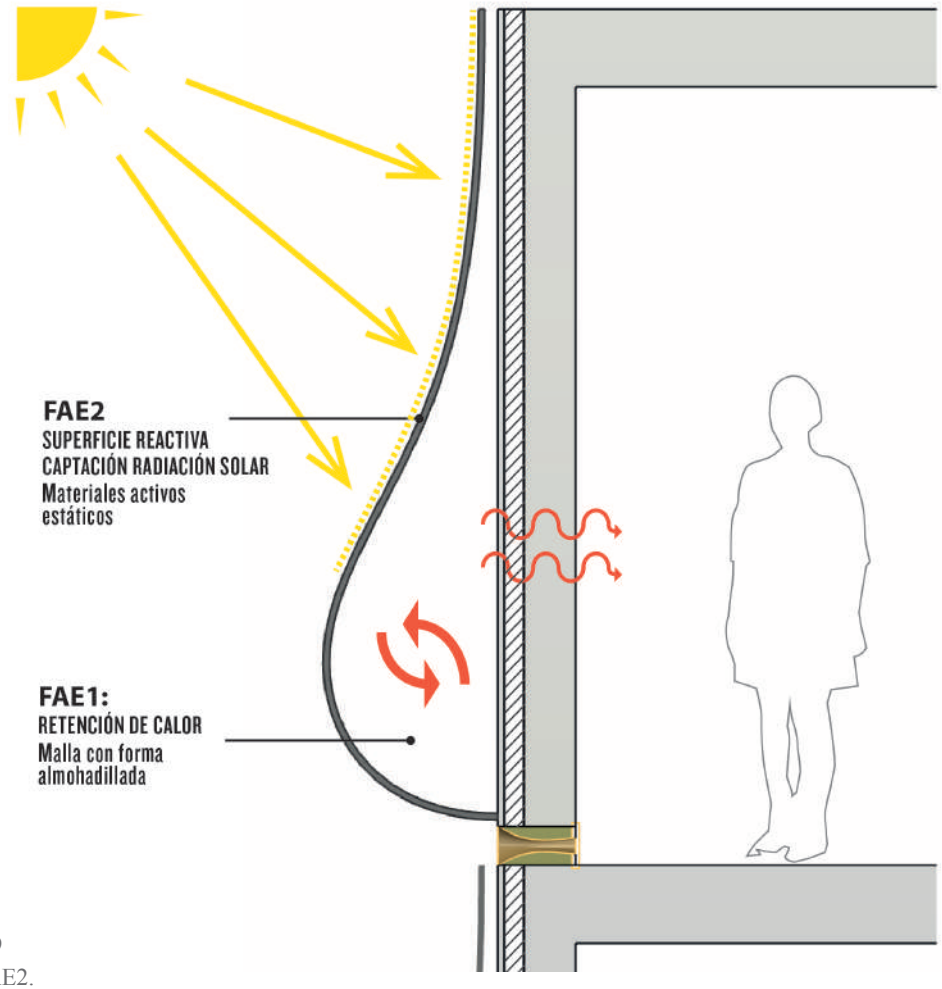


Figura 4.39
FAE1 + FAE2.

- **Funcionamiento adaptativo estático 2 (FAE2):** este tipo de adaptabilidad se alcanza por medio de estrategias estructurales reactivas que no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento y los cambios afectan directamente a la estructura interna del material y sus propiedades específicas, como la capacidad de absorción de la radiación solar. Para obtener ganancias térmicas del exterior, se plantea una solución de absorción de parte de la radiación solar recibida sobre la envolvente, tomando como inspiración los colores oscuros, en ocasiones rojo, de la superficie foliar de algunos especímenes como *Arctostaphylos alpina* o *Sphagnum capillifolium*. Esta adaptación ayuda a absorber más calor del sol y poder reiniciar la fotosíntesis lo antes posible (Alcaraz *et al.*, 1999). Por tanto, la estrategia estática de colores oscuros se traduce en estrategias reactivas de captación de la radiación solar, mediante la configuración de la membrana (FAE1) (Figura 4.39) fabricada con materiales activos estáticos, los cuales se detallarán en el apartado 4.9.1.2.

- **Sistema compuesto (FAD1) + (FAE3):**

  - **Funcionamiento adaptativo dinámico 1 (FAD1):** este tipo de adaptabilidad se alcanza por medio de mecanismos estructurales reactivos, es decir aquellos en los que se observa cierto tipo de movimiento que da lugar a cambios en la configuración de la envolvente por medio de partes móviles. El mecanismo dinámico de apertura estomática para intercambio gaseoso con el exterior se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo reactivo de ventilación como proceso que regula los niveles de calidad del aire interior (Figura 4.40). La demanda de la energía requerida para mantener el ambiente interior a cierta temperatura en invierno se incrementa si aumenta la pérdida de calor por transmisión en la envolvente o si aumenta la pérdida por ventilación. Por ello, durante los meses fríos se evita la ventilación a través de las ventanas y con ello se impide la renovación del aire. Además, los materiales aislantes de la envolvente actúan como una barrera entre el ambiente exterior y los espacios interiores, reduciendo la calidad del aire interior y disminuyendo la satisfacción de los ocupantes (Taylor & Imbabi, 1998). Esto sugiere que, a pesar del requerimiento de mantener el calor, la infiltración de aire a través de la envolvente es importante para lograr la calidad del aire interior (DB-HS, 2016). Por todo ello, se plantea el FAD1 como un sistema con capacidad de expandirse y abrirse para posibilitar la renovación del aire hacia el exterior del edificio. Mediante este mecanismo se pretende asegurar la ventilación necesaria para contribuir alcanzar la calidad del aire interior, especialmente en períodos fríos del año. El mecanismo proyectado consiste en una membrana permeable y elástica, la cual se abre o se cierra mediante un sistema de válvulas. Este mecanismo reacciona bajo cambios de la composición del aire interior, evitando olores desagradables y riesgos de contaminación por la presencia de partículas, gérmenes o dióxido de carbono. A través de esta membrana reactiva se expulsa el exceso de contaminantes por difusión, manteniendo el aire en un estándar de confort con un mínimo consumo energético y evitando así ventilar más de lo necesario para no aumentar la demanda de energía de calefacción. Este sistema puede contribuir a asegurar una calidad de aire adecuada para la actividad de las personas y evitando problemas de salud (Bustamante, 2009).

· **Funcionamiento adaptativo estático 3 (FAE3):** el mecanismo propuesto para el FAD1 se complementa con el FAE3 para lograr la conservación del calor interior durante el proceso de ventilación. En este caso, la adaptabilidad propuesta consiste en la protección de las bajas temperaturas externas, reduciendo la pérdida de calor por ventilación y así reducir el consumo energético en sistemas de calefacción. Tomando como inspiración la estrategia de estomas protegidos se diseña un sistema con morfología de embudo que facilita el movimiento del aire hacia el exterior. A su vez, la estrategia de pubescencia foliar para disminuir el enfriamiento, se traduce gráficamente, y de forma abstracta, en una capa que permite la salida del aire por filtración pero impide la entrada de aire frío exterior (Figura 4.40). Estas dos estrategias pueden contribuir a mantener los niveles de confort térmico interior durante la ventilación.

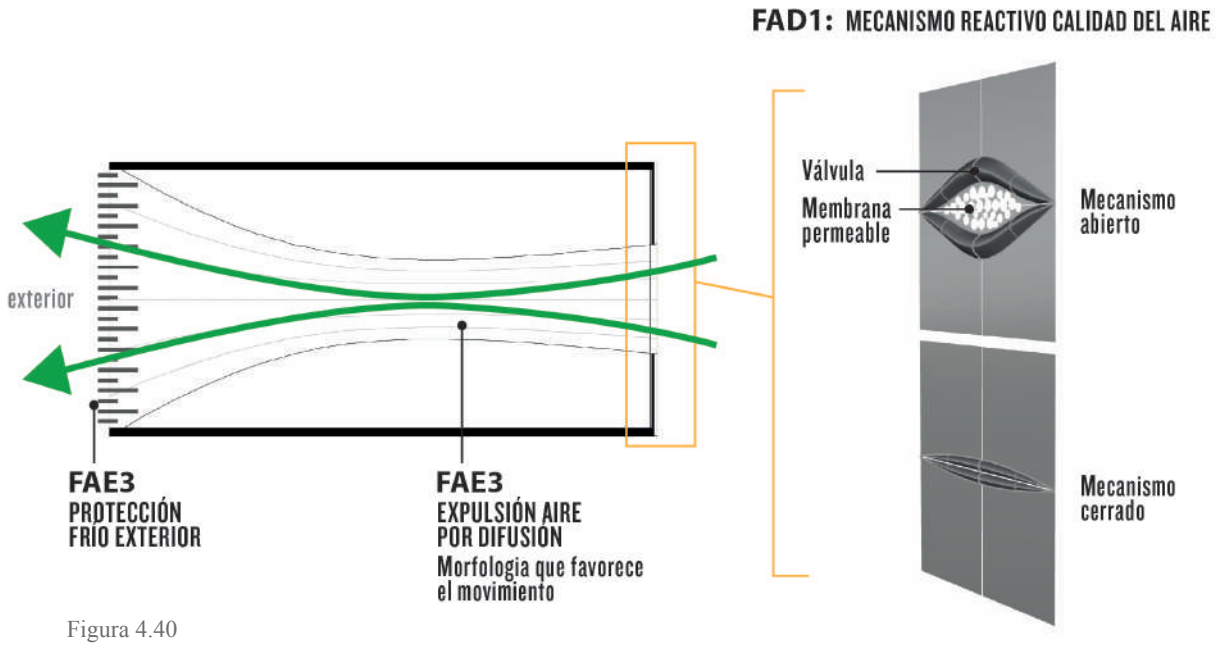


Figura 4.40
FAD1 + FAE3

La materialización de los funcionamientos adaptativos expuestos (FAE2 y FAD1) en implementaciones técnicas, tal y como se ha explicado en el capítulo 2, será posible a través de los materiales activos. Por ello, se estudian diversos materiales activos para su posible aplicación en el diseño conceptual presentado. A continuación se presenta un listado de posibles materiales activos y la realización de algunos experimentos:

4.9.1.1 Materiales activos dinámicos

La implementación técnica del FAD1 se desarrollará mediante el uso de materiales activos dinámicos, en los que cierto tipo de movimiento es observable a simple vista. El mecanismo de ventilación propuesto se materializará a través de configuraciones materiales que le permitan doblarse, rotar o curvarse para posibilitar la entrada y salida de aire entre el exterior y el interior del edificio. Los materiales activos dinámicos buscados son aquellos reactivos al dióxido de carbono, que darán lugar a cambios reversibles en la configuración de la envolvente por medio de sistemas capaces de abrirse y cerrarse, a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material, sin necesidad de estímulos eléctricos.

Materiales reactivos al dióxido de carbono

· **Polímeros:** dentro de esta categoría se distinguen dos tipos de materiales poliméricos. Polímeros que responden al dióxido de carbono a través de un accionamiento sensible a la variación de dicho parámetro. Y polímeros con capacidad de capturar el dióxido de carbono. Investigaciones recientes de la Universidad de Hamburgo (Lin & Theato, 2013) (Liu *et al.,* 2017), pronostican que los polímeros sensibles al dióxido de carbono serán ampliamente utilizados en aplicaciones de la ciencia de los materiales, dadas las ventajas de este parámetro ambiental como estímulo desencadenante: abundante disponibilidad, bajo costo, ahorro de energía, no tóxico, buena reversibilidad o gran biocompatibilidad, entre otras.

4.9.1.2 Materiales activos estáticos

La implementación técnica del FAE2 se desarrollará mediante el uso de materiales activos estáticos, en los que los cambios no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento, afectando directamente a la estructura interna del material y sus propiedades específicas como la capacidad de absorción de la radiación solar. Los materiales activos estáticos buscados son aquellos reactivos a la temperatura, que darán lugar a cambios reversibles en la configuración de la envolvente por medio de color, opacidad o brillo a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material, sin necesidad de estímulos eléctricos.

Materiales reactivos a la temperatura

· **Polímeros o tintas termocrómicas:** el termocromismo es la propiedad por la que las sustancias cambian su color debido a un cambio de temperatura. Estos materiales alteran su estructura molecular en reacción a los cambios de la energía térmica, dando lugar a diferentes valores de reflectividad que modifican la radiación reflejada en el rango visible del espectro electromagnético y cambiando su color (Addington & Schodek, 2004). Diversos estudios sobre el diseño de ventanas inteligentes (Parkin & Manning, 2006) (Saeli *et al.,* 2010) han concluido que el uso de recubrimientos termocrómicos sobre el vidrio puede influir en las propiedades de transmisión en respuesta a la temperatura y resultar en un menor consumo de energía en los edificios. Por ello, para la ejecución del FAE2 se considera la posibilidad del uso de materiales termocrómicos, como dispositivos que detectan cambios en la temperatura del entorno y responden activamente mediante un cambio de color que implicaría la absorción de la radicación solar y por tanto la captación de calor para contribuir al aumento de las ganancias térmicas a través de la envolvente.

En la Figura 4.41 se presentan algunas imágenes de los experimentos realizados con polímeros termocrómicos en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la Universidad de Oviedo, en el año 2015 (López *et al.,* 2015). Los experimentos se llevaron a cabo mediante tecnología de impresión 3D (Strauss, 2013), con filamento "MagicFilTM Thermo PLA". Este filamento de polímero termocrómico está compuesto por PLA (ácido poli-láctico) y un aditivo que le permite la función de cambio de color. El material está configurado para cambiar su color y opacidad a través de las variaciones de temperatura. Cuando la temperatura del material es inferior a 29 ºC tiene un color gris antracita opaco. Al sobrepasar los 30 ºC el material cambia su color a gris claro, variando al mismo tiempo su grado de opacidad-transparencia. Las impresiones realizadas consistieron en diversas muestras de geometría rectangular constante, de dimensiones 100 x 20 x 2,4 mm, en los que se fueron aplicando cambios en la configuración de impresión. Se seleccionó el relleno de la pieza como parámetro relevante, y se realizaron diversas impresiones modificando la densidad de relleno y el patrón o tipo de estructura interna. Se probaron cuatro densidades de relleno, 15% - 25% - 50 % - 70%, los patrones rectilíneo y lineal. En el análisis de los resultados obtenidos con el cambio de estos parámetros, se observó que a menor densidad de relleno más rápido se consigue el cambio de opacidad-transparencia; y que con el patrón rectilíneo se logra un efecto de transparencia más uniforme que con el lineal.

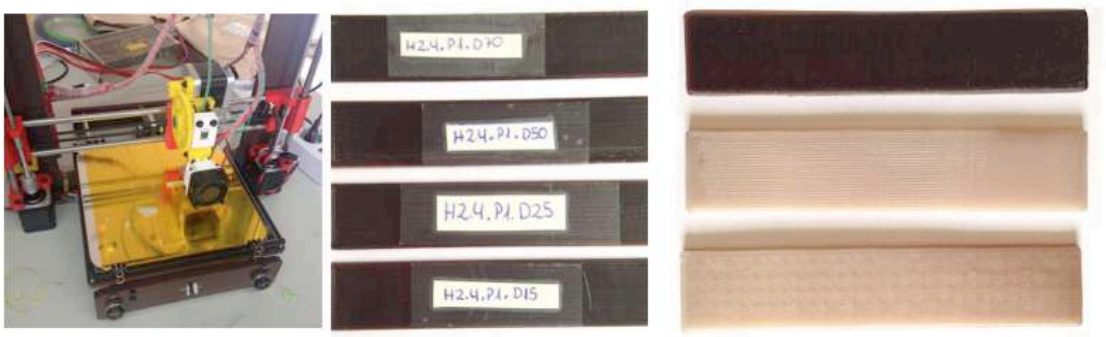


Figura 4.41
Experimentos con material termocrómico mediante impresión 3D.

4.9.2 Diseño adaptativo

En el apartado 4.6.3 se ha iniciado el proceso de exploración de los patrones estomáticos de las plantas más representativas de las regiones cálidas. Y aunque se ha observado cierto potencial en los patrones de los estomas (Figura 4.42) como herramienta para crear patrones innovadores para las envolventes de edificios, a través de la proporción de opacidad y transparencia en su superficie, aún no se han alcanzado resultados satisfactorios para la generación de patrones para envolventes arquitectónicas. Por ello se considera como un posible desarrollo futuro continuar con la exploración de los patrones estomáticos con el objetivo de extraer parámetros aplicables al diseño adaptativo de envolventes. Así, además de mediante el funcionamiento adaptativo, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a través de patrones definidos como criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño.

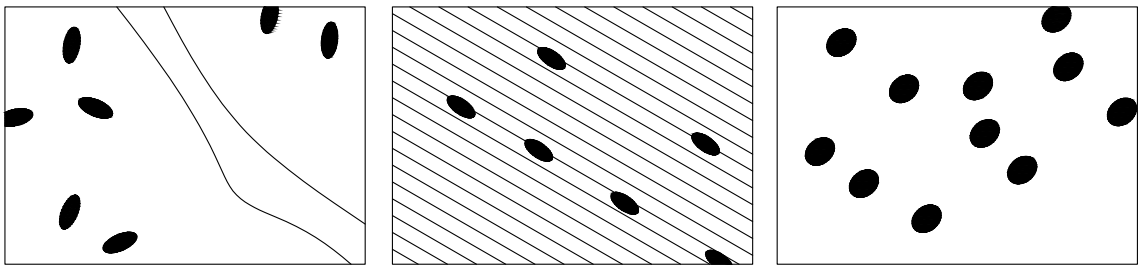


Figura 4.42 Patrones estomáticos de las plantas seleccionadas en climas fríos.

4.10 Conclusiones

La mayoría de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en los climas fríos, se resuelven mediante materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para calentar la temperatura ambiente. Las soluciones comunes para hacer frente a las bajas temperaturas exteriores y lograr el confort térmico interior consisten en sistemas de calentamiento del aire, mediante radiadores; sistemas de calefacción por suelo radiante; convectores de emisión de calor por convección; o sistemas de aire acondicionado. Normalmente estos aparatos térmicos se fijan a las paredes, o se acoplan en los techos o suelos de las estancias, ocupando grandes superficies de espacio, además de las salas destinadas a la combustión para la generación de calor. Asimismo, el uso de este tipo de instalaciones contribuye al aumento de la demanda energética en los edificios. Por otra parte, para la conservación de las ganancias térmicas interiores, la envolvente es considerada como una barrera térmica que debe evitar la pérdida de calor mediante el aislamiento, lo cual mejora la hermeticidad del aire,

reduciendo el calentamiento necesario y contribuyendo así a una disminución en el consumo de energía. Sin embargo, los materiales aislantes actúan como una barrera entre el ambiente exterior y los espacios interiores, reduciendo la calidad del aire interior y disminuyendo la satisfacción de los ocupantes. Esto sugiere, que a pesar del requerimiento de mantener el calor, la infiltración de aire a través de la envolvente es importante para lograr la calidad del aire interior. Por todo ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas frías definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas.

A lo largo de este capítulo se han expuesto diferentes mecanismos y estrategias de adaptación que las plantas han desarrollado para hacer frente a los desafíos de frío, déficit hídrico y falta de luz en invierno en las regiones de climas fríos. Siguiendo las fases propuestas en la metodología "De las plantas a la arquitectura" se han explorado y valorado diferentes adaptaciones para una posible aplicación al diseño de envolventes. Se presenta una matriz de diseño con las funciones a desarrollar por la envolvente de climas fríos, la cual propone 4 mecanismos dinámicos y 16 estrategias estáticas, haciendo un total de 20 posibles procesos biológicos como soluciones de aplicación. Para la generación del diseño conceptual se abordan los desafíos de las bajas temperaturas y la falta de luz durante el invierno, mediante la selección de las siguientes funciones: ganar calor, conservar calor, regular la humedad, ganar radiación solar e intercambiar aire con el exterior.

Se propone, como ejemplo de envolvente en climas fríos, un caso de diseño que capte y conserve el calor permitiendo la ventilación mediante un sistema que minimize las pérdidas de calor. Para ello se seleccionan diversos mecanismos dinámicos y estrategias estáticas como características dominantes que proporcionan pautas para la generación de tal diseño conceptual. Las adaptaciones seleccionadas son: la apertura estomática para intercambio gaseoso con el exterior; el crecimiento en densas almohadilladas o de porte rastrero para resistir al fuerte viento manteniendo una temperatura interior más cálida; pubescencia foliar para disminuir el enfriamiento; estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración; y colores oscuros para mayor absorción radiación solar.

El caso de diseño supone el primer paso hacia la implementación técnica, y se aborda desde la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. En el "Caso de diseño 1" presentado, el mecanismo dinámico de apertura estomática se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo de ventilación pasiva. La combinación de este mecanismo con las estrategias estáticas de pubescencia foliar y estomas protegidos forman un sistema que permite la ventilación para lograr la calidad del aire interior minimizando las pérdidas de calor. Adicionalmente las otras tres estrategias estáticas seleccionadas se traducen gráficamente, y también de forma abstracta, en estrategias reactivas de captación de la radiación solar y conservación del calor generado.

Finalmente se aborda la posible materialización de los funcionamientos adaptativos expuestos a través de los materiales activos. Por ello, se estudian diversos materiales activos para su posible aplicación en el diseño conceptual presentado, mediante la presentación de un listado de posibles materiales activos y la realización de algunos experimentos realizados con polímeros termocrómicos.

Conclusions

Most of the existing solutions to achieve envelopes' adaptability in cold climates, are solved by materials that provide insulation and technologies to warm the ambient temperature. Common solutions to face the low external temperatures and to achieve the interior thermal comfort consist of systems of heating air, by means of radiators; floor heating systems; convection heaters or air conditioning systems. Usually, these thermal devices are fixed to walls, or they are coupled in the ceilings or floors of the rooms, occupying large areas of space, in addition to the room destined to combustion for heat generation. Likewise, the use of this type of facilities increases the energy demand in the buildings. On the other hand, for the conservation of the internal thermal gains, the envelope is considered as a thermal barrier that must avoid the loss of heat through the insulation. This improves air tightness, reducing the necessary heating and thus contributing to a decrease in energy consumption. However, insulation materials act as a barrier between the exterior environment and interior spaces, reducing the quality of indoor air and decreasing occupant satisfaction. This suggests that, despite the requirement to maintain heat, infiltration of air through the enclosure is important to achieve indoor air quality. Therefore, this research proposes the adaptability of the envelope to cold climatic conditions defined in a passive way through new biomimetic design challenges based on the abstraction of plant adaptations.

Throughout this chapter different adaptation mechanisms and strategies that plants have developed to face the challenges of cold, water deficit and lack of light in winter in regions of cold climates, have been discussed. Following the phases proposed in the methodology *"From plants to architecture"*, different adaptations have been explored and evaluated for a possible application to the envelope design. A design matrix with the functions to be developed by the cold climate envelope is presented. The matrix proposes 4 dynamic mechanisms and 16 static strategies, making a total of 20 possible biological processes as application solutions.

Idea generation in conceptual design takes into account challenges of low temperatures and lack of light, addressed by selecting the following functions: gain heat, conserve heat, regulate humidity, gain solar radiation and exchange air with the outside. A design case is proposed, which captures and conserves heat allowing ventilation through a system that minimizes heat losses.

Several dynamic mechanisms and static strategies are selected as dominant characteristics that provide guidelines for the generation of such conceptual design. The chosen adaptations are: stomatal opening for gas exchange with the outside; growth in dense cushions or of creeping portage to resist the strong wind maintaining a warmer interior temperature; foliar pubescence to reduce cooling; stomata protected to reduce water loss through transpiration; and dark colors for greater absorption solar radiation.

The design case is the first step towards technical implementation, and is addressed from the graphic translation of biological principles in construction systems. In the "Design Case 1" presented, the dynamic stomatal opening mechanism is translated, graphically and abstractly, into a passive ventilation mechanism. The combination of both, this mechanism with the static strategies of foliar pubescence and protected stomata form a system that allows ventilation to achieve the quality of indoor air, minimizing heat losses. Additionally, the other three static strategies selected are translated into reactive strategies for capturing solar radiation and conserving the generated heat.

Finally, the materialization of the adaptive behaviours exposed is discussed through active materials. So, several active materials are studied for their potential application in the conceptual design presented.

Referencias

Addington, M., Schodek, D., (2004) *Smart Materials and Technologies. For the Architecture and Design Professions.* Oxford, United Kingdom: Architectural Press.

Alcaraz, F.; Clemente, M.; Barreña, J.A. y Álvarez Rogel, J. (1999) *Manual de teoría y práctica de Geobotánica.* ICE Universidad de Murcia y Diego Marín. Murcia.

Azcón-Bieto J, Talón M (2000) *Fundamentos de Fisiología Vegetal.* McGraw-Hill Interamericana/Edicions Universitat de Barcelona. ISBN 84-486-0258-7

Bilow, M. *International Façades - CROFT. Climate Related Optimized Façade Technologies.* A+BE | Architecture and the Built Environment, [S.l.], n. 1, p. 1-360, apr. 2012, doi:http://dx.doi.org/10.7480/abe.2012.1., disponible en http://abe.tudelft.nl/index.php/faculty-architecture/article/view/bilow (consultado en 2016)

Bhushan B., (2009) *Biomimetics: lessons from nature–an overview*, Phil. Trans. R. Soc. A 2009 367 1445-1486; DOI: 10.1098/rsta.2009.0011, 2009

Bustamante W., (2009) *Guia de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.* División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa País de Efi- ciencia Energética (CNE), Santiago de Chile, 2009.

Codron, J. C. G., (2011) *Biogeografía*, Universidad de Cantabria disponible en http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia. (consultado en 2016)

Codron, J. C. G., (2011) *Biogeografía, Los factores de distribución de los seres vivos*, Universidad de Cantabria, disponible en http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia/materiales/pdfs-temas/2%2C%20Los%20factores%20de%20distribucion%20de%20los%20seres%20vivos.pdf (consultado en 2016)

DB-HS, Documento Básico Ahorro de energía, Código Técnico de la Edificación, disponible en http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf (consultado en 2016)

Filella, I., Peñuelas, J., (1999) *Altitudinal differences in UV absorbance, UV reflectance and related morphological traits of Quercus ilex and Rhododendron ferrugineum in the Mediterranean region.* Plant Ecology 145: 157-165.

García, J.M., (1990) *Geoecología de las áreas de montaña*. Geoforma, Logroño, 338 pp.

Gerrard, J., (1990) *Mountain environments: an examination of the physical geography of mountains.* MIT, 317 pp.

Gibson, L., (2012) *The hierarchical structure and mechanics of plant materials.* Journal of the Royal Society Interface, 12, 106. doi: 10.1098/rsif.2012.0341

Knaack, U., Tillmann, K., Bilow, M., & Auer, T., (2007) *Facades: Principles of Construction.* Basel: Birkhauser.

Koch, K., Bhushan, B., and Barthlott, W., (2009) *Multifunctional surface structures of plants. An inspiration for biomimetics.* Philosophical Transactions of the Royal Society, 367, 1487-1509. doi: 10.1098/rsta.2009.0022

Körner, C., (1989) *Functional morphology of mountain plants*. Flora 182: 353-383.

Körner, C., (2003) *Plant Alpine Life.* Springer-Verlag, Berlin.

Lin, S., Theato, P. (2013) *CO2-responsive polymers,* Macromolecular Rapid Communications, 34(14), 1118-1133. doi: 10.1002/marc.201300288

Liu, H, Lin, S, Feng, Y, Theato, P, (2017) *CO2-Responsive polymer materials*, Polym. Chem.,8, 12-23, DOI: 10.1039/C6PY01101B

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles.* J Facade Des Eng;3(1):2015. http://dx.doi.org/10.3233/FDE-150026.

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Adaptive architectural envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control*. In: Proceedings of the 10th conference on advanced building skins, Bern, Switzerland; November 2015.

López, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford B., (2017) *How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 67, Pages 692-703, ISSN 1364-0321, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018.

Martin ES, Donkin ME, Stevens RA., (1983) *Stomata*. London: Edward Arnold.

Molina-Montenegro, M.A., (2008) *Variación de la pubescencia foliar en plantas y sus implicaciones funcionales a lo largo de gradientes altitudinales*, Ecosistemas, vol. 17, núm. 1, pp. 146-154, Asociación Española de Ecología Terrestre, Alicante, España.

Parkin, I. P., & Manning, T. D., (2006) *Intelligent Thermochromic Windows*. Journal of Chemical Education, 83(3)

Perés-Martínez, J., Arizaleta, M., Sanabria, M. E., Brito, L. (2004) *Características de los estomas, densidad e índice estomático y su variación en función a la injestación en Annona muricata L. y A. montana MADFAC.* Bioagro, 16(3), 213-218.

Raven P.H, Evert R.F, Eichhorn, S.E, (1992) *Biología de las plantas*, Ed: Reverté S.A.

Reyes-López, D., Quiroz-Valentín, J., Kelso-Bucio, H., Huerta-Lara, M., Avendaño-Arrazate, C., & Lobato-Ortiz, R. (2015) *Caracterización estomática de cinco especies del género Vanilla.* Agronomía Mesoamericana, 26(2), 237-246. doi:http://dx.doi.org/10.15517/am.v26i2.19279

RITE, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios disponible en http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx (consultado en 2016).

Rundel, P., Smith, A., Meinzer, F. (1994) *Tropical Alpine Environments*. Cambridge University Press, UK.

Saeli, M., Piccirillo, C., Parkin, I.P., Binions, R., and Ridley, I. (2010) *Optimisation of Thermochromic Thin Films on Glass*; Design of Intelligent Windows. Advances in Science and Technology, 75.

Strauss, H., (2013) AM Envelope. *The potential of Additive Manufacturing for facade constructions*. A+BE | Architecture and the Built Environment, [S.l.], n. 1, p. 1-270. ISSN 2214-7233, disponible en http://abe.tudelft.nl/index.php/faculty-architecture/article/view/strauss (consultado en 2015) doi:http://dx.doi.org/10.7480/abe.2013.1.

Taiz L, Zeiger E., (2007) *Fisiologia Vegetal*, Volumen 1, Universidad Jaume I, Servicio de comunicación y publicaciones.

Taylor, B.J. & Imbabi, M.S., (1998) *The application of dynamic insulation in buildings.* Renwable energy, 15, http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00190-6

Toral, M, Manríquez, A, Navarro-Cerrillo, R, Tersi, D, & Naulin, P. (2010) *Características de los estomas, densidad e índice estomático en secuoya (Sequoia sempervirens) y su variación en diferentes plantaciones de Chile.* Bosque (Valdivia), 31(2), 157-164. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000200009

Vogel, S., (2012) *The life of a leaf*, University of Chicago Press.

Walter, H., (1977) *Zonas de vegetación y clima*, Ed. Omega: Barcelona.

WBCS, Worldwide Bioclimatic Classification System, Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez, 1996-2017, disponible en http://www.globalbioclimatics.org/default.htm (consultado en 2017)

Willmer, C., Fricker, M.., (1996) *Stomata*, Volume 2: Topics in plant functional biology. Springer Science & Business Media; http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0579-8.

Quercus petrae

CAPÍTULO 5

Climas templados

"Estamos al borde de una revolución material que será comparable a la edad del hierro y a la revolución industrial. Estamos dando un salto adelante hacia una nueva era de materiales. En el próximo siglo, creo que la biomímesis alterará significativamente nuestra manera de vivir."

Prof. M. Sarikaya,
Ciencia e Ingeniería de materiales Universidad de Washington

CHAPTER 5

Temperate climates

Abstract

The temperate and humid regions of middle latitudes are subject to temperate climates, being characteristic the deciduous temperate forest as the main biome. In Europe it is located in its western façade (Atlantic forest) and to the East forming a central strip by continental regions. The latitudinal limits are marked by the low temperatures to the North and the small precipitations to the South. This chapter, dedicated to temperate climates, studies the adaptations of deciduous temperate forests to the pronounced climatic seasonality, with temperate to moderately warm summers and cool or cold winters depending on continentality, in addition to abundant water resources. As previously explained, in chapter 2, this research is only concerned with adaptations of plants because they lack displacement and, unlike animals, remain more exposed to changing environmental conditions. In temperate climates, the conditions of cold and lack of water during the winter, for example, will be observed. Due to these factors most trees lose their leaves during the unfavorable season to avoid suffering damages. Throughout this chapter different adaptation strategies explored in the plants of the temperate regions will be studied for possible applications in architectural envelopes in temperate climates, following the methodology *"From the plants to the architecture"* presented in Chapter 3. Based on adaptations to pronounced seasonality will result solutions of mechanisms and strategies, with great potential for technical applications in the design of envelopes.

The chapter begins with an introduction to the temperate climatic characteristics, through the interpretation of bioclimate diagrams of different cities located in regions. In section 5.3 the deciduous temperate forest biome and their respective plant communities are analysed. Research is focused on the study of the adaptations of the plants to this climatic conditions. Point 5.4 develops the exploration of biophysical information, with a description of the challenges that these plants have to face, according to the environmental parameters of temperature, humidity, light and carbon dioxide. An extensive search for biological models of adaptation to the pronounced seasonality and the landscape conditions of dense forests as limiting factors for the development in these regions, is presented.

Once the biophysical information is obtained, all the examples of interest are listed in point 5.5. The proposed classification organizes the structural systems of adaptation of the plants to the temperate regions according to dynamic mechanisms or static strategies, according to each selected environmental parameter. This classification aims to facilitate the transfer of knowledge from the inspiration in plants to the development of new architectural solutions. Point 5.6 makes an assessment of the structural adaptation systems studied, stressing stomata as structures of special interest. Stomata have a wide presence in the species that evolved, adopting adaptive solutions to temperate climates, both as dynamic mechanisms and static strategies. After considering the interest of the stomata in the process of biomimetic inspiration, the study of its functioning and its structural systems is deepened. The role of stomata in different plants representing temperate climates is analysed, with the objective of transferring them to conceptual designs for architectural envelopes throughout section 5.8. Finally, in section 5.9, a study case of theoretical envelope design is presented, through dynamic and static adaptive behaviour, in addition to its adaptive design. Section 5.10 details the conclusions of the chapter.

5.1. Introducción

Las regiones templadas y húmedas de latitudes medias se encuentran sometidas a climas templados (Figura 5.1), siendo característico el bosque templado caducifolio como principal bioma. En Europa se localiza en su fachada occidental, bosque atlántico, y hacia el este formando una franja central por regiones continentales, cuyos límites latitudinales los marcan las bajas temperaturas hacia el norte y las escasas precipitaciones al sur. El presente capítulo dedicado a los climas templados estudia las adaptaciones de los bosques templados caducifolios a la marcada estacionalidad climática, con veranos templados a moderadamente cálidos e inviernos frescos o fríos en función de la continentalidad, y con abundantes recursos hídricos.

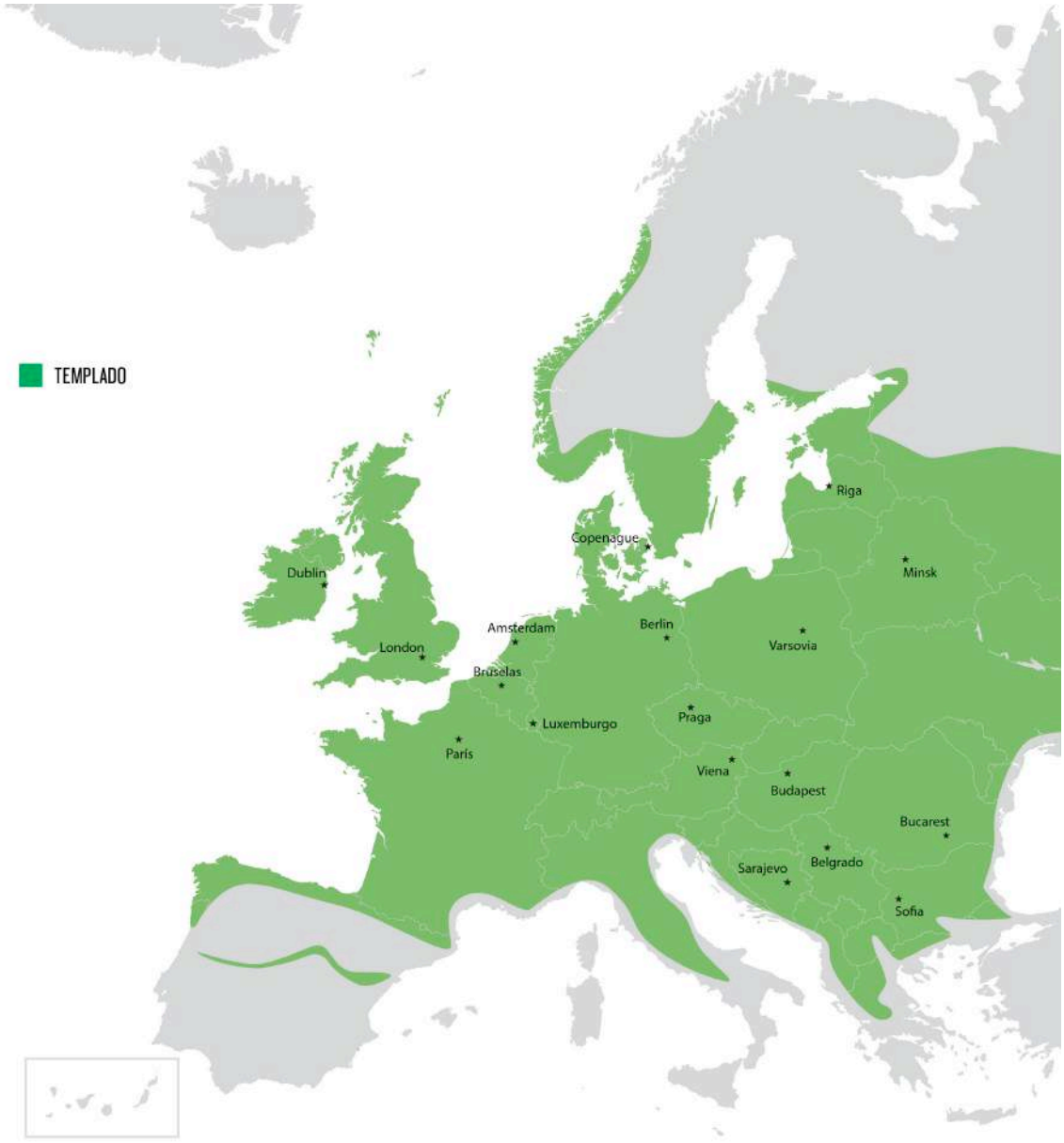


Figura 5.1 Mapa de las regiones templadas en Europa, macrobioclima Templado. Reelaboración a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017)

Como ya se ha justificado anteriormente, en el capítulo 2, esta investigación se interesa únicamente en las adaptaciones de las plantas por carecer de desplazamiento y, a diferencia de los animales, permanecer más expuestas a las cambiantes condiciones ambientales. En el recorrido por los climas templados se observará cómo las condiciones de frío y falta de agua durante el invierno limitan la actividad vegetal, por lo que la mayoría de los árboles pierden sus hojas durante la estación desfavorable para evitar sufrir daños. A lo largo de este capítulo serán estudiadas diferentes estrategias de adaptación exploradas en las plantas de las regiones templadas para posibles aplicaciones en envolventes arquitectónicas en climas templados, siguiendo la metodología *De las plantas a la arquitectura* presentada en el capítulo 3. De las adaptaciones a la marcada estacionalidad surgirán soluciones de mecanismos y estrategias, con un gran potencial para aplicaciones técnicas en el diseño de envolventes.

El capítulo comienza con una introducción a las características climáticas templadas, mediante la interpretación de bioclimogramas de diferentes ciudades situadas en regiones pertenecientes a dicho clima. En el punto 5.3 se analiza el bioma del bosque templado caducifolio y sus respectivas comunidades vegetales, centrando el estudio en las adaptaciones de las plantas a las condiciones climáticas. El punto 5.4 desarrolla la exploración de la información biofísica, con una descripción de los desafíos a los que tienen que hacer frente dichas plantas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono y una extensa búsqueda de modelos biológicos de adaptación a la marcada estacionalidad climática y las condiciones paisajísticas de bosques densos e impenetrables, como factores limitantes para el desarrollo en las regiones de climas templados.

Una vez obtenida la información biofísica, en el punto 5.5 se ordenan todos los ejemplos hallados de interés, según una clasificación que organiza los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones templadas según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. El punto 5.6 realiza una valoración de los sistemas estructurales de adaptación estudiados, destacando los estomas como estructuras de especial interés, con amplia presencia en las especies que evolucionaron y adoptaron soluciones adaptativas a los climas templados, tanto como mecanismos dinámicos como estrategias estáticas.

Tras considerar el interés de los estomas en el proceso de inspiración biomimética, se profundiza en el estudio de su funcionamiento y sus sistemas estructurales a través de diversas plantas representativas de climas templados, para poder transferirlos a diseños conceptuales para envolventes arquitectónicas a lo largo del punto 5.8. Finalmente, en el apartado 5.9, se presenta un caso de diseño teórico de envolvente, mediante el funcionamiento adaptativo dinámico y estático (tectónica) y la definición de su diseño adaptativo (características morfológicas). En el punto 5.10 se detallan las conclusiones del capítulo.

5.2. Climas

5.2.1. Macrobioclima Templado

Tomando como referencia la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017) se considera que tienen macrobioclima templado, a cualquier altitud y valor de continentalidad, todos los territorios extratropicales de la Tierra comprendidos entre las latitudes 23º a 66º Norte, en los que no existen o se compensan dos o más meses consecutivos con aridez durante el verano o período más cálido del año. La clasificación establece unos valores de temperatura media anual T, menor de 21ºC y mayor de 0ºC, en función del índice de continentalidad Ic, el cual expresa la amplitud de la oscilación anual de la temperatura. Los valores establecidos son: territorios hiperoceánicos Ic>11, T> 6.0ºC; territorios oceánicos Ic=11-21, T>5.3ºC; territorios subcontinentales Ic=21-28, T>4.8ºC; territorios eucontinentales Ic=28-46, T>3.8ºC; y territorios hipercontinentales Ic>46, T>0ºC. En las regiones de macrobioclima templado los inviernos son frescos en las regiones de clima oceánico pero fríos o incluso muy fríos en las fachadas orientales y en el centro de los continentes; los veranos son prolongados y templados con tendencia a cálidos. Respecto a la pluviosidad, generalmente se trata de regiones húmedas con precipitaciones importantes en torno a los 500-1000mm anuales, distribuidas a lo largo de todo el año. Además la elevada humedad atmosférica y la abundante nubosidad dificultan la evaporación y hacen que se reduzca la amplitud térmica diaria. Por lo general solo se produce un pequeño déficit de agua a finales de verano, mientras que en primavera existe un alto excedente de agua en el suelo. En líneas generales, el macrobioclima templado en Europa se caracteriza por una influencia atlántica o litoral en las regiones más occidentales, con menores oscilaciones térmicas y mayores precipitaciones, y en las regiones situadas hacia el este la amplitud térmica aumenta y la pluviosidad disminuye debido a la continentalidad, y en todo caso con verano sin déficit hídrico. Respecto a la latitud, hacia el sur la temperatura va en aumento y la disponibilidad de agua, en cambio, disminuye.

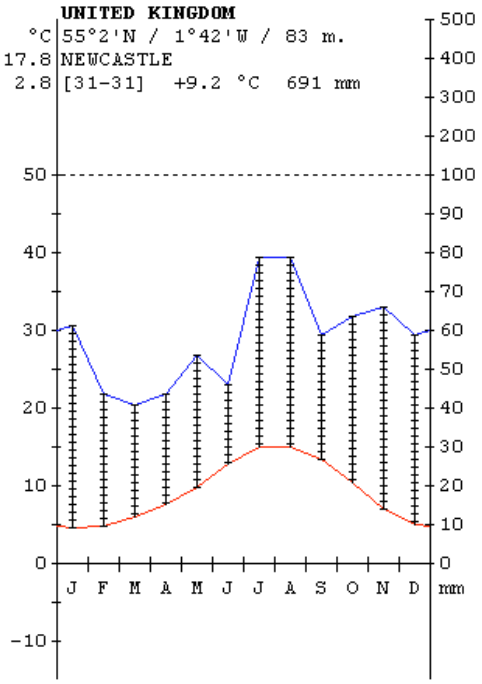


Figura 5.2 Bioclimograma de Newcastle, Reino Unido. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

Como visualización de estas características climáticas se adjuntan cinco bioclimogramas o diagramas climáticos, tres de las estaciones situadas en las ciudades de Newcastle en Reino Unido (Figura 5.2), Lyon en Francia (Figura 5.3) y Bratislava en Eslovaquia (Figura 5.4), y otros dos de las ciudades españolas de Gijón (Figura 5.5) y Lalín (Figura 5.6), todas ellas pertenecientes al macrobioclima templado. Los diagramas han sido extraídos de la base de datos de la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (WBCS, 2017) e indican las relaciones de las temperaturas y precipitaciones medias a lo largo del año en las diferentes estaciones de Reino Unido, Francia, Eslovaquia y España, obteniendo *"las bases más importantes para valorar el clima desde el punto de vista ecológico"* (Walter, 1977). De la lectura de los diagramas se refleja las temperaturas moderadas del macrobioclima templado, con temperaturas medias anuales entre 9,2ºC y 14ºC, en Newcastle y Gijón respectivamente; así como las abundantes precipitaciones, con valores entre los 658mm anuales en la región continental de Bratislava y los 1.342mm anuales en la región oceánica atlántica de Lalín.

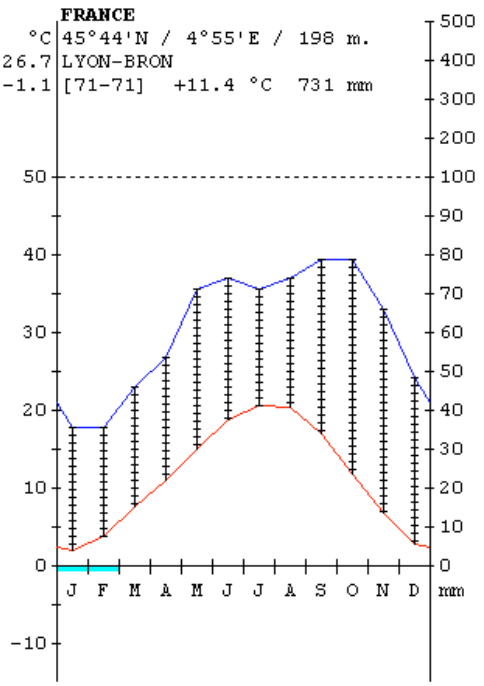


Figura 5.3 Bioclimograma de Lyon, Francia . Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

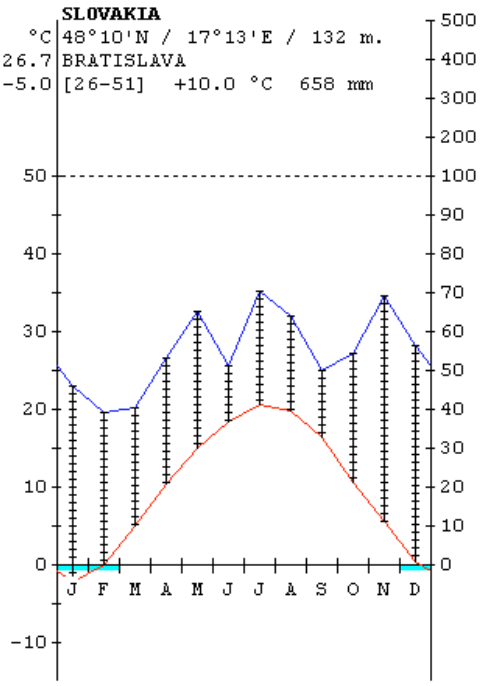


Figura 5.4 Bioclimograma de Bratislava, Eslovaquia. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

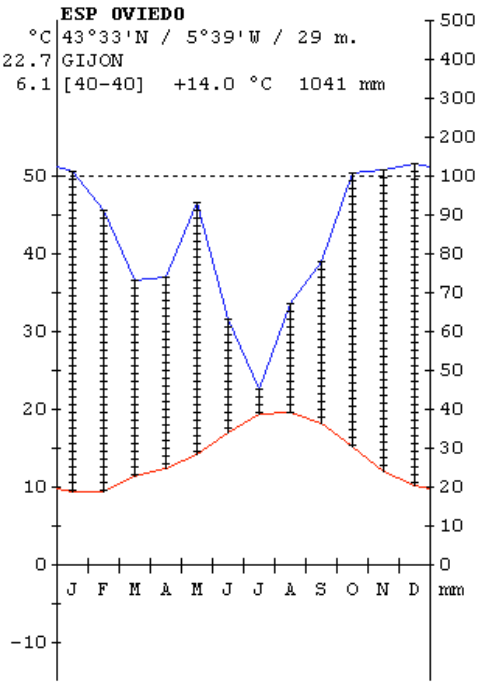


Figura 5.5 Bioclimograma de Gijón, España. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

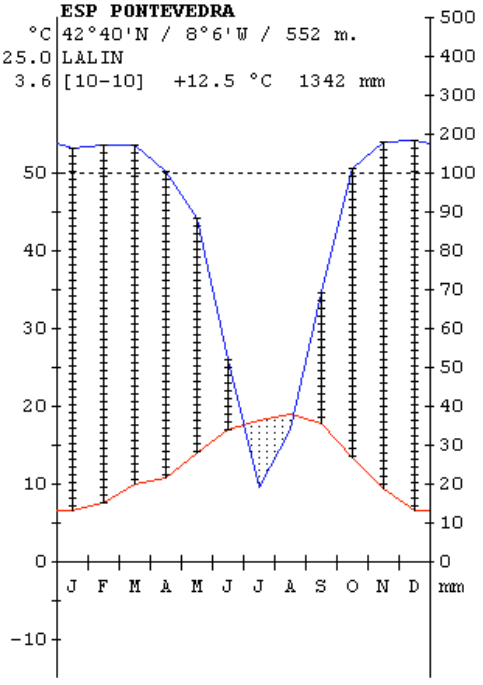


Figura 5.6 Bioclimograma de Lalín, España. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

5.3. Biomas

5.3.1. Bosque templado caducifolio

Características generales

El macrobioclima templado lo ocupa una región biogeográfica muy rica en comunidades vegetales, desde los bosques de caducifolios que requieren abundantes precipitaciones; vegetaciones arbustivas y herbáceas de tipo estépico adaptadas a un ligero déficit hídrico estacional; o formaciones forestales de coníferas. Generalmente, los paisajes típicos de estos ambientes son los bosques templados caducifolios, que dan paso a los bosques mixtos de caducifolios y coníferas en las zonas de transición hacia los bosques boreales de coníferas de la taiga.

Bosque templado caducifolio

Bioma con elevada humedad atmosférica y abundante nubosidad que dificulta la evaporación y reduce la amplitud térmica diaria. Los bosques caducifolios son aquellos dominados por altos árboles de hoja ancha, como robles, arces o hayas, que dejan caer todos los años sus hojas durante el invierno, produciéndose un gran cambio de vegetación a lo largo de las cuatro estaciones del año. Con inviernos fríos, veranos cálidos y abundantes precipitaciones bien distribuidas a los largo del año, las hojas anchas y delgadas de la mayoría de los árboles se caen para limitar al mínimo la pérdida de agua, reduciendo así la transpiración y entrando en un período de reposo invernal.

Previamente a la caída de las hojas y debido al acortamiento de las horas de luz en otoño, estas sufren la retirada de la clorofila y por tanto su color verde, dando lugar a hojas de colores rojos, naranjas o amarillos. Este mecanismo de pérdida de las hojas está regulado por el fotoperiodo, motivado por la adaptación a las bajas temperaturas y los posibles daños por heladas, unido a la baja luminosidad en invierno por la corta duración de los días y a la dificultad de absorber agua del suelo al encontrarse muchas veces congelada (Walter, 1977) (Alcaraz *et al.*, 1999) (Codron, 2011).

Los árboles que forman estos bosques son principalmente hayas (*Fagus*) en las zonas más húmedas y robles (*Quercus*), además de otras especies como castaños (*Castanea*), carpes *(Carpinus)*, tilos (*Tilia*), arces (*Acer*), abedules (*Betula*) y nogales (*Juglans*). Cuando los terrenos se encuentran peor drenados, y en las orillas de los ríos, los bosques caducifolios pasan a estar formados por alisos (*Alnus*), alamos (*Populus*), sauces (*Salix*), fresnos (*Fraxinus*) y olmos (*Ulmus*). También pueden encontrarse algunas coníferas, como pinos o abetos dentro de estos bosques caducifolios, siendo más abundantes en los sustratos rocosos y arenosos. La resistencia al frío determina el límite continental de muchas especies y explica que la composición del bosque caducifolio vaya cambiando desde las áreas oceánicas hacia las interiores. También es importante señalar que las condiciones ambientales en el bosque caducifolio son variables en altura, desde la parte alta donde incide la radiación solar y se intercepta el agua de lluvia, al nivel del suelo con penumbra y humedad semipermanentes. Por ello los árboles de estos bosques suelen tener en sus partes más altas hojas de sol, adaptadas para lograr rendimientos muy altos gracias a una elevada insolación, mientras que en los inferiores presentan hojas de sombra, especializadas en medios poco luminosos, con caracteres anatómicos y ecológicos diferentes.

El sotobosque se compone de árboles pequeños y de arbustos con poca densidad, que se hacen mucho más abundantes en los márgenes y claros de los bosques, compuesto por arbustos de ericáceas como los brezos (*Erica*, *Calluna vulgaris*) y pequeños árboles como los serbales (*Sorbus*), los avellanos (*Corylus*), los piornos o escobones (*Genista, Cytisus*), y muchas espinosas como los rosales, endrinos y zarzas (*Rosa, Prunus, Rubus*), casi todas caducifolias, pudiendo destacar entre las pocas especies perennifolias los acebos (*Ilex*) y a los tejos (*Taxus*). En el suelo hay pocas herbáceas, ya que los árboles interceptan la mayor parte de la luz y absorben casi toda el agua dificultando la vida de las plantas de pequeñas dimensiones, existiendo un estrato de hierbas perennes, además de líquenes y musgos en la base de los troncos y salientes rocosos entre la hojarasca.

Bosque mixto de coníferas y caducifolios

Estos bosques representan una amplia zona de transición entre el bosque templado caducifolio y la taiga, bordeando por el norte a los bosques caducifolios, y donde la proporción de coníferas es mucho mayor de la habitual en los bosques caducifolios. El bosque mixto caducifolio deja paso al boreal de coníferas tras una franja de transición ocupada por bosques mixtos.

Bosque templado de coníferas

Dentro de las latitudes del macrobioclima templado, en las zonas en las que el clima se hace más frío y los suelos son menos profundos, como ocurre en las altas montañas, las coníferas dominan el paisaje al igual que en el bosque boreal visto en el capítulo 4.

Adaptaciones generales

El bosque templado caducifolio está marcado por la no disponibilidad de agua durante una gran parte del invierno, por ello la vegetación pierde sus hojas anchas y delgadas como adaptación a la falta de agua, las bajas temperaturas y los posibles daños por heladas. También en algunas especies se produce dimorfismo foliar o una diferenciación de las hojas entre la parte alta de mayor insolación con hojas de sol y la parte inferior menos luminosa con hojas de sombra. Las hojas de sol son más gruesas y nerviadas y tienen mayor densidad estomática, además pueden ajustar continuamente la orientación de la superficie foliar para controlar la absorción de la luz por seguimiento solar y así interceptar el máximo posible de radiación. En las zonas sombrías existen puntos de luz o manchas de radiación solar que pasan a través de huecos en la cubierta vegetal y se mueven por las hojas de sombra según los movimientos del sol. Los puntos de luz generan rápidas respuesta del aparato fotosintético y de los estomas en las hojas de sombra para capturar los destellos de luz solar (Taiz & Zeiger, 2007). En las regiones donde los inviernos son muy fríos las plantas de hojas persistentes tienen caracteres xeromorfos como adaptación a las heladas, presentando hojas de tamaño reducido; cutícula gruesa y compacta; recubrimiento ceroso; estomas hundidos en criptas estomáticas; hojas revolutas; hojas suculentas.

5.3.2 Adaptaciones climas templados

A lo largo de las descripciones previas del bosque templado caducifolio se ha visto cómo su vegetación ha desarrollado diferentes mecanismos y estrategias de adaptación para hacer frente a la marcada estacionalidad, aunque son adaptaciones menos extremas que las desarrolladas en los climas fríos o cálidos. A continuación se resumen de una forma general, las adaptaciones de las hojas más representativas de los climas templados:

- **Adaptaciones morfológicas:** hojas anchas y delgadas que se caen para reducir la transpiración y protegerse de la falta de agua, las bajas temperaturas y los daños por heladas; dimorfismo foliar entre la parte alta del árbol con hojas de sol y la parte inferior más oscura con hojas de sombra.

- **Adaptaciones xeromórficas:** las plantas situadas en las zonas más frías que mantienen sus hojas todo el año adoptan adaptaciones de tipo xeromórfico, asociadas a los climas cálidos y áridos pero que también proporcionan ventajas a las plantas de las zonas frías. Este tipo de adaptación incluye hojas de tamaño reducido; cutícula gruesa y compacta; recubrimiento ceroso; estomas hundidos en criptas estomáticas; hojas revolutas; hojas suculentas.

5.4. Exploración información biofísica

5.4.1 Parámetros ambientales

Previamente se ha descrito cómo la marcada estacionalidad climática y las condiciones paisajísticas de bosques densos e impenetrables, son los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas templados. A continuación de describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente dichas plantas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono (Figura 5.7):

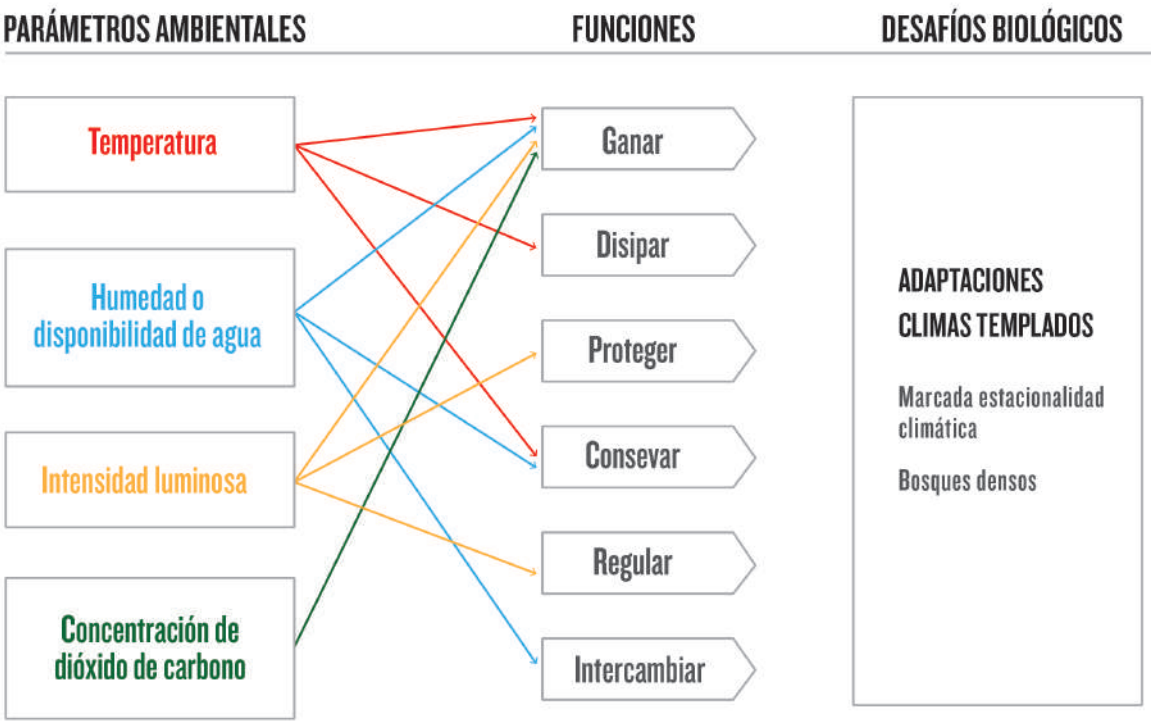


Figura 5.7
Diagrama que ilustra los desafíos a los que tienen que hacer frente las plantas de las regiones templadas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

· **Temperatura:** durante las épocas del año con temperaturas más altas, los árboles del bosque templado caducifolio pueden disipar o proteger de la radiación de calor absorbido por sus grandes hojas por enfriamiento por evaporación, debido a que el abundante aporte de agua existente permite altas tasas de transpiración, así a medida que el agua se evapora a la vez consume calor de la hoja y esta se enfría. Durante los inviernos fríos, los mecanismos y estrategias de adaptación para ganar y conservar calor pasan por la caída de las hojas en la mayoría de las plantas o la adquisición de rasgos xeromórficos en las plantas de hoja perenne.

· **Humedad:** en los bosques templados, debido a la elevada humedad atmosférica y la abundante nubosidad, el agua se pierde mucho más lentamente dificultando el proceso de evaporación al encontrarse el aire saturado de agua. Por ello las plantas de los bosques umbríos tienen hojas grandes, pues la pérdida de agua no es un problema al que tengan que hacer frente durante la primavera y el verano. Sin embargo, con la llegada del otoño y durante el invierno, las mismas plantas presentan mecanismos y estrategias de adaptación para ganar y retener humedad, debido a la falta de agua, las bajas temperaturas y los posibles daños por heladas.

· **Luz:** en los bosques de los climas templados la energía lumínica que reciben los vegetales varía mucho desde hojas que se encuentran expuestas al sol a otras permanecen siempre en penumbra, y en esta competencia por la luz solar los árboles representan la mayor adaptación para la captación de luz. Por la cubierta de la mayoría de los bosques penetra muy poca luz y casi toda la radiación solar es absorbida por las hojas de la copa de los árboles. En las zonas sombrías existen puntos de luz o manchas de radiación solar que pasan a través de huecos en la cubierta vegetal y se mueven por las hojas de sombra según los movimientos del sol. Los puntos de luz generan rápidas respuesta del aparato fotosintético y de los estomas en las hojas de sombra para capturar los destellos de luz solar. Estos mecanismos y otras estrategias morfoanatómicas de adaptación son desarrolladas en las hojas de las plantas para regular, reflejar o absorber la radiación luminosa disponible.

· **Dióxido de carbono:** dado que la actividad fotosintética es una función logarítmica de la intensidad de la luz, en las zonas más sombrías del bosque templado caducifolio, debido a la falta de luz, el proceso de la fotosíntesis es menos eficaz. Sin embargo muchas de las plantas de sombra son plantas de metabolismo C3, las cuales se benefician más de los aumentos en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (Taiz & Zeiger, 2007).

5.4.2 Modelos biológicos

La exploración de modelos biológicos es la búsqueda y análisis de ejemplos de adaptación de las plantas a los climas cálidos, a través de la biomecánica y morfología funcional de la superficie de sus hojas. Dicha exploración se organiza según los conceptos de desafío, función y estrategia ya explicados en el capítulo 3. Para cada parámetro ambiental se identifican diversas funciones, de las cuales resultarán la estrategias de adaptación de las plantas a su entorno. Es importante destacar la multifuncionalidad de las superficies de las hojas (Gibson, 2012) (Bhushan, 2009), lo que quiere decir que cada planta desarrolla varias y simultáneas estrategias de adaptación a su entorno y que a su vez una misma estrategia puede desempeñar diferentes funciones que hagan frente a diferentes desafíos a los que tiene que hace frente la planta. A continuación se desarrolla la exploración de los modelos biológicos organizada de acuerdo a tres niveles (Figura 5.8).

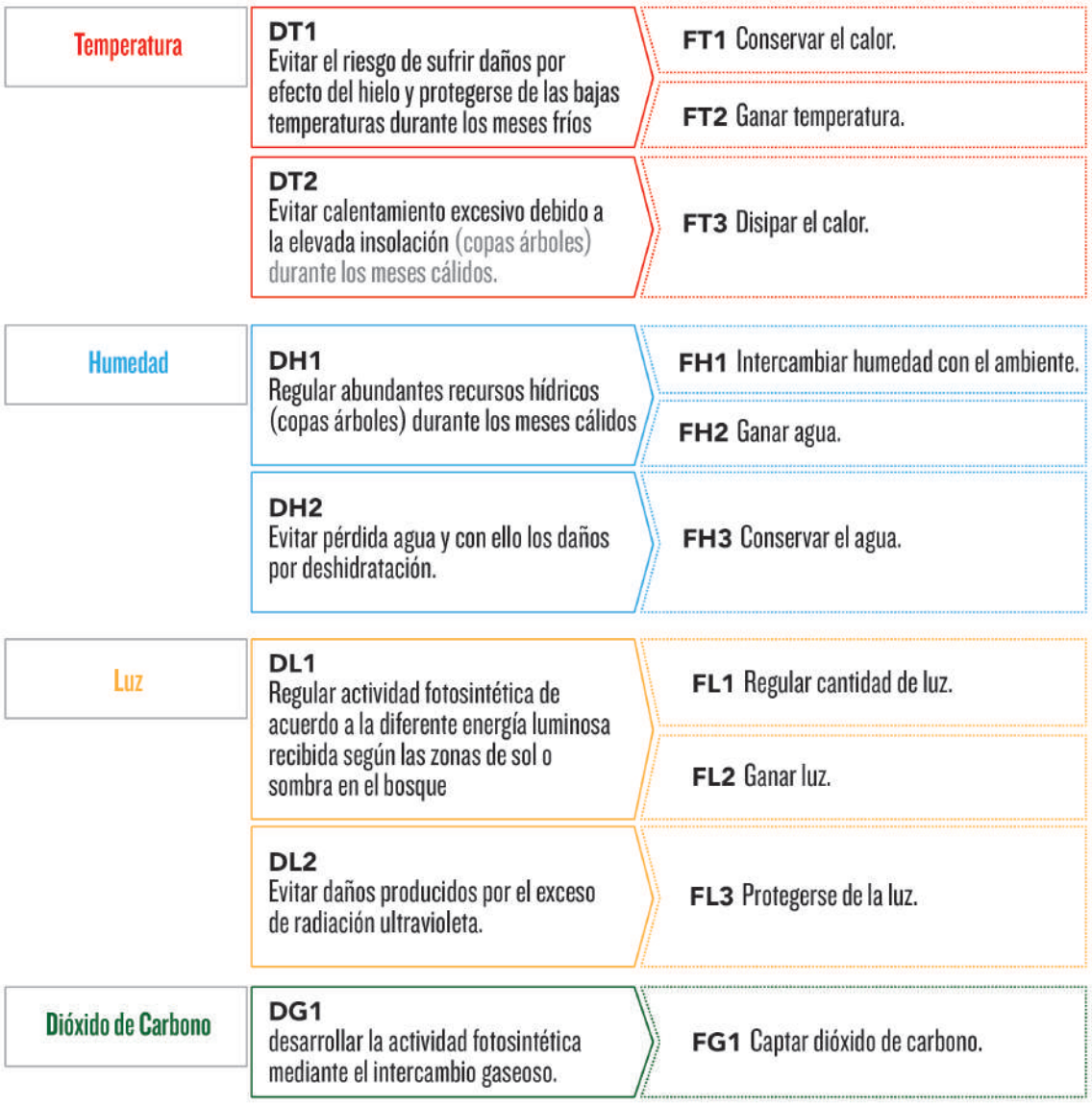


Figura 5.8
Diagrama de la exploración de estrategias de los modelos biológicos organizada según parámetro ambiental, desafío y función.

- **Nivel 1:** este primer nivel define el parámetro ambiental temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

- **Nivel 2:** este segundo nivel identifica los desafíos o retos a los que tiene que hacer frente la planta. Desafíos identificados: evitar el riesgo de sufrir daños por efecto del hielo y protegerse de las bajas temperaturas durante los meses fríos; evitar calentamiento excesivo debido a la elevada insolación durante los meses cálidos; regular abundantes recursos hídricos durante los meses cálidos; evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación; regular actividad fotosintética de acuerdo a la diferente energía luminosa recibida según las zonas de sol o sombra en el bosque; evitar daños producidos por el exceso de radiación ultravioleta y desarrollar la actividad fotosintética mediante el intercambio gaseoso.

- **Nivel 3:** el tercer nivel distingue las diferentes funciones que definen directamente el desafío biológico al que hacer frente. Funciones definidas: conservar el calor, ganar temperatura, disipar el calor, intercambiar humedad con el ambiente, ganar agua, conservar el agua, regular cantidad luz, ganar luz, protegerse de la luz y captar dióxido de carbono.

Finalmente, cada una de las funciones definidas resultan en una o varias estrategias biológicas, como la forma en la que las hojas se han adaptado al medio frío dando respuesta a los desafíos funcionales. A continuación se expone la exploración de los modelos biológicos realizada:

5.4.2.1 Temperatura

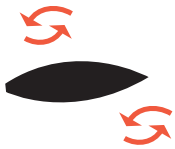
DESAFÍO DT1:	>	**FUNCIÓN FT1:**
Durante los meses fríos evitar el riesgo de sufrir daños por efecto del hielo y protegerse de las bajas temperaturas		Conservar el calor

Estrategia: hojas caducas

Modelo biológico: *Fagus sylvatica, Quercus petraea, Fraxinus excelsior, Betula pendula*

Figura 5.9 *Fagus sylvatica.* Fuente: elaboración propia.

Estrategia: hojas perennes de tamaño reducido



Modelo biológico: *Daboecia cantabrica, Buxus sempervirens, Calluna vulgaris*

Figura 5.10 *Daboecia cantabrica.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: crecimiento de porte rastrero

Modelo biológico: *Arctostaphylos uva-ursi, Vaccinium vitis-idaea*

Figura 5.11 *Arctostaphylos uva-ursi.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas perennes aciculares

Modelo biológico: *Pinus sylvestris, Abies alba, Taxus baccata*

Figura 5.12 *Abies alba.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas con márgenes revolutos para mantener una capa de aire inmovil en el envés

Modelo biológico: *Erica vagans, Buxus sempervirens*

Figura 5.13 *Erica vagans.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: enrollamiento foliar

Modelo biológico: *Rhododendron*

Figura 5.14 *Rhododendron.* Fuente: elaboración propia.

DESAFÍO DT1:	>	**FUNCIÓN FT2:**
Durante los meses fríos evitar el riesgo de sufrir daños por efecto del hielo y protegerse de las bajas temperaturas		Ganar temperatura

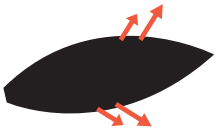
Estrategia: hojas perennes de colores oscuros

Modelo biológico: *Vaccinium vitis-idaea, Daphne laureola*

Figura 5.15 *Daphne laureola.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DT2:	>	FUNCIÓN FT3:
Durante los meses cálidos evitar el calentamiento excesivo debido a la elevada insolación en las copas de los árboles.		Disipar el calor

Estrategia: hojas grandes que permiten enfriamiento por pérdida discreta de calor



Modelo biológico: *Fagus sylvatica, Quercus petraea, Fraxinus excelsior, Betula pendula.*

Figura 5.16 *Fraxinus excelsior.*
Fuente: elaboración propia.

5.4.2.2 Humedad

DESAFÍO DH1:	>	FUNCIÓN FH1:
Durante los meses cálidos regular abundantes recursos hídricos (copas árboles)		Intercambiar humedad con el ambiente

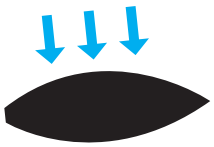
Estrategia: hojas con mayor densidad estomática en el envés para una mayor transpiración

Modelo biológico: *Fagus sylvatica, Quercus petraea, Fraxinus excelsior, Betula pendula*

Figura 5.17 *Betula pendula.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DH1:	>	FUNCIÓN FH2:
Durante los meses cálidos regular abundantes recursos hídricos (copas árboles)		Ganar agua

Estrategia: hojas anchas que interceptan parte del agua de lluvia



Modelo biológico: *Fagus sylvatica, Quercus petraea, Fraxinus excelsior, Betula pendula*

Figura 5.18 *Quercus petraea.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DH2:	>	FUNCIÓN FH3:
Durante los meses evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación.		Conservar el agua

Estrategia: hojas caducas

Modelo biológico: *Fagus sylvatica, Quercus petraea, Fraxinus excelsior, Betula pendula*

Figura 5.19 *Fagus sylvatica.* Fuente: elaboración propia.

Estrategia: hojas suculentas como sistema de almacenamiento agua

Modelo biológico: *Sedum*

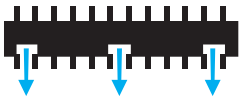
Figura 5.20 *Sedum.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas aciculares perennes para reducir las pérdidas de agua por transpiración

Modelo biológico: *Pinus sylvestris, Abies alba, Taxus baccata*

Figura 5.21 *Taxus baccata.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: superficie cerosa para disminuir la permeabilidad



Modelo biológico: *Daphne laureola, Pinus sylvestris, Abies alba, Ilex aquifolium*

Figura 5.22 *Pinus sylvestris.* Fuente: elaboración propia.

Estrategia: hojas coriáceas para disminuir la permeabilidad

Modelo biológico: *Arctostaphylos uva-ursi, Buxus sempervirens, Hedera helix, Vaccinium myrtillus, Ilex aquifolium*

Figura 5.23 *Hedera helix.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas con márgenes revolutos para reducir la superficie de transpiración

Modelo biológico: *Erica vagans, Buxus sempervirens, Calluna vulgaris*

Figura 5.24 *Buxus sempervirens.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: reducción número estomas para disminuir la permeabilidad

Modelo biológico: *Pinus sylvestris*

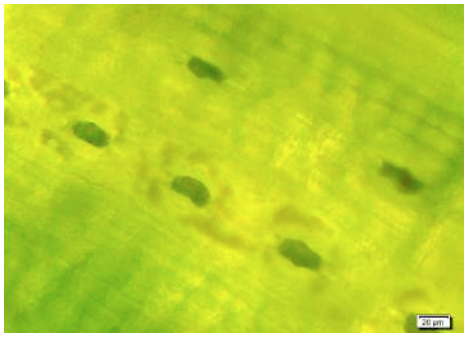


Figura 5.25 *Pinus sylvestris.* Fuente: elaboración propia.

Estrategia: estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración

Modelo biológico: *Pinus sylvestris*

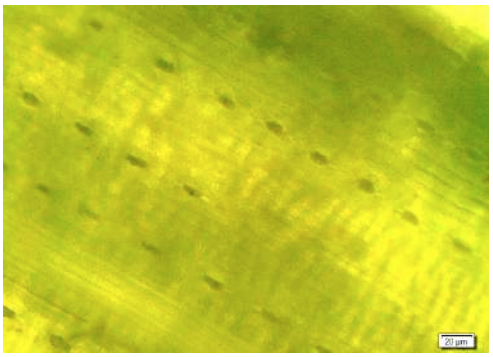


Figura 5.26 *Pinus sylvestris.*
Fuente: elaboración propia.

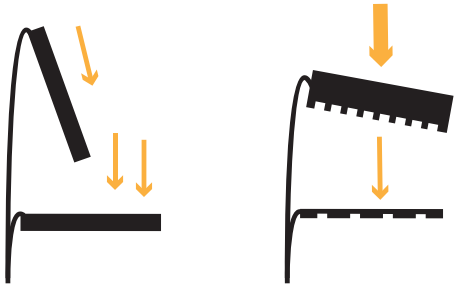
5.4.2.3 Luz

DESAFÍO DL1:	>	FUNCIÓN FL1:
Regular actividad fotosintética de acuerdo a la diferente energía luminosa recibida según las zonas de sol o sombra en el bosque.		Regular cantidad luz

Estrategia: dimorfismo foliar en altura:

· hojas de sol: más gruesas y nerviadas con ajuste de orientación solar y aumento densidad estomática

· hojas de sombra: más delgadas y anchas con movimientos estomáticos de rápida respuesta a los puntos de luz



Modelo biológico: *Fagus sylvatica, Acer spp, Tilia cordata, Taxus baccata, Fraxinus excelsior*

Figura 5.27 *Tilia cordata.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DL1:	>	FUNCIÓN FL2:
Regular actividad fotosintética de acuerdo a la diferente energía luminosa recibida según las zonas de sol o sombra en el bosque.		Ganar luz

Estrategia: hojas de sombra en el sotobosque umbrío con movimientos estomáticos de rápida respuesta a los puntos de luz

Modelo biológico: *Ruscus aculeatus, Anemone nemorosa, Buxus sempervirens, Circaea lutetiana, Poa nemoralis, Melica uniflora, Luzula sylvatica, Ilex aquifolium*

Figura 5.28 *Ruscus aculeatus.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: colores oscuros para absorber radiación solar

Modelo biológico: *Vaccinium vitis-idaea, Daphne laureola, Ilex aquifolium*

Figura 5.29 *Ilex aquifolium.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

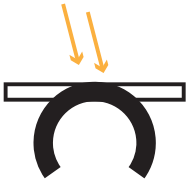
DESAFÍO DL2:	>	FUNCIÓN FL3:
Evitar daños producidos por el exceso de radiación ultravioleta		Protegerse de la luz

Estrategia: superficie cerosa para reflejar radiación ultravioleta

Modelo biológico: *Pinus sylvestris, Abies alba, Taxus baccata*

Figura 5.30 *Abies Alba.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: enrollamiento foliar



Modelo biológico: *Rhododendron*

Figura 5.31 *Rhododendron.* Fuente: elaboración propia.

5.4.2.4 Dióxido de Carbono

DESAFÍO DG1:	>	FUNCIÓN FG1:
Desarrollar la actividad fotosintética mediante el intercambio gaseoso		Captar dióxido de carbono

Estrategia: apertura estomática

Modelo biológico: cualquiera de las citadas previamente

Figura 5.32 *Abies Alba.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

5.5. Clasificación de datos

Una vez realizada la exploración de los modelos naturales pertenecientes a los climas templados se elabora una recopilación de datos de los ejemplos biológicos explorados, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas (López *et al.*, 2017). A continuación se presenta la clasificación que ordena los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones templadas según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

5.5.1. Mecanismos dinámicos

Dentro de la categoría mecanismos dinámicos (MD) se consideran aquellas adaptaciones que responden a estímulos externos a través del movimiento, esto es, mecanismos biológicos que exhiben movimientos rápidos y reactivos en una escala de tiempo que podemos percibir, como respuesta a cambios en el medio circundante.

En la Figura 5.33 se recogen los mecanismos explorados en las hojas de plantas de climas templados, con adaptaciones para hacer frente a la marcada estacionalidad climática y las condiciones paisajísticas de bosques densos e impenetrables. La abstracción de los mecanismos dinámicos encontrados de interés darán lugar al funcionamiento adaptativo dinámico en la envolvente de climas templados, a través de su tectónica para reaccionar y mutar ante los estímulos exteriores que la solicitan.

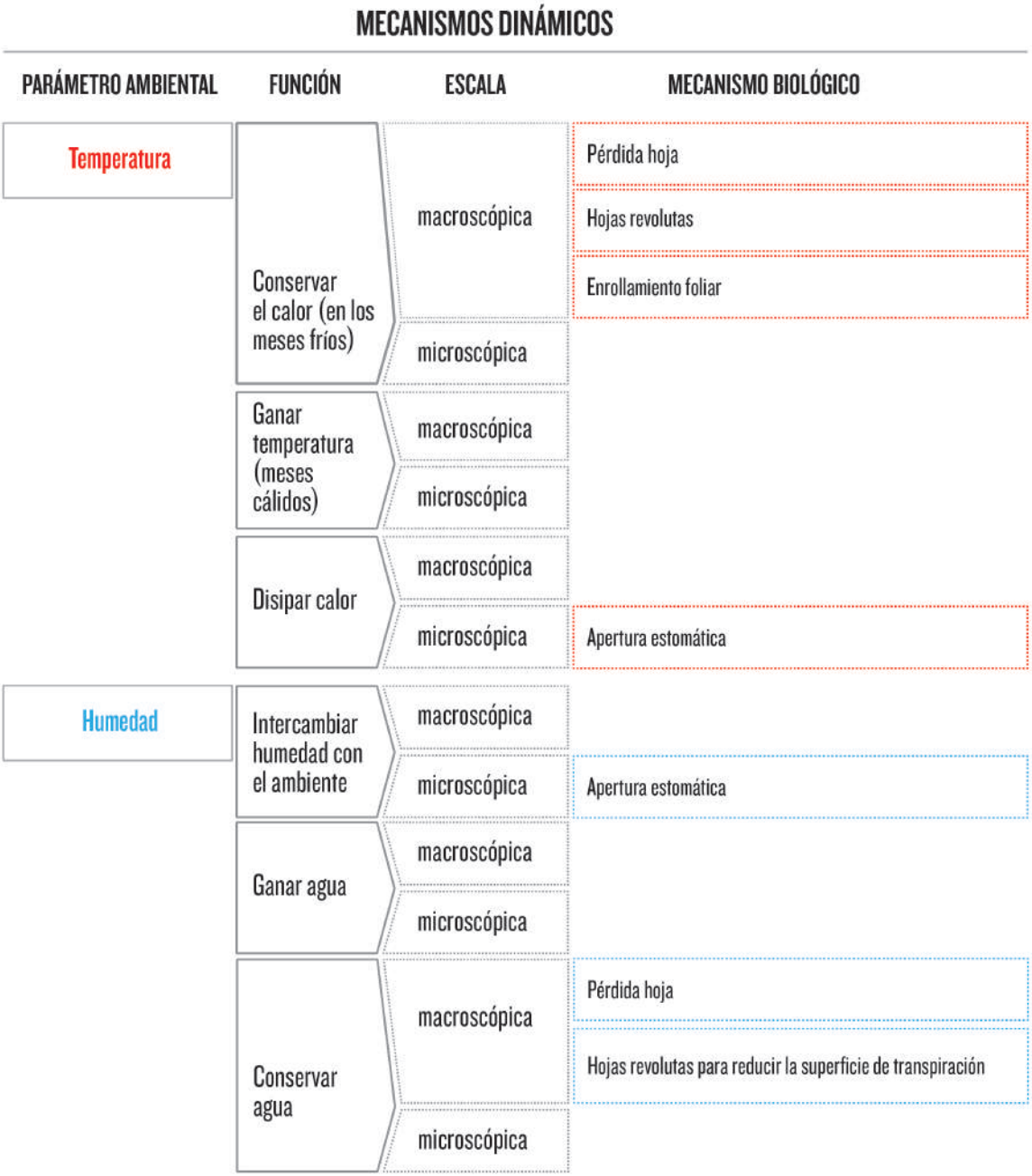


Figura 5.33-A
Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas templados, (temperatura y humedad).

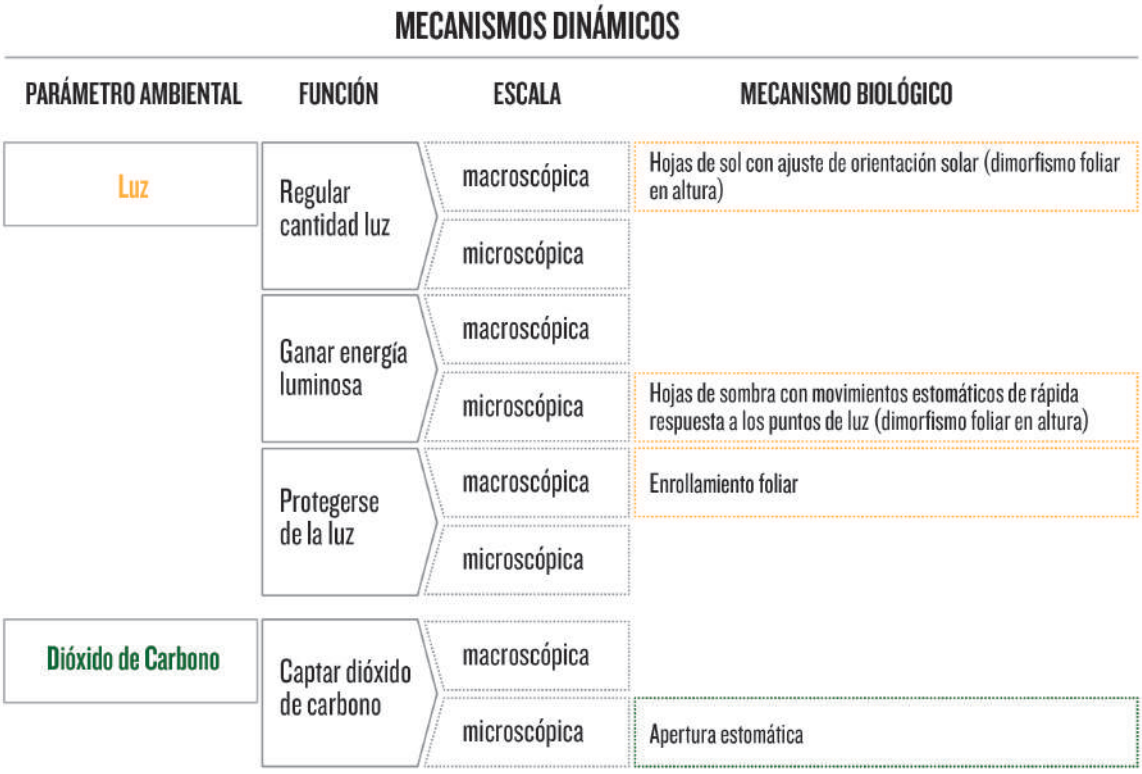


Figura 5.33-B
Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas templados, (luz y dióxido de Carbono).

5.5.2. Estrategias estáticas

Se consideran estrategias estáticas (EE) aquellas morfologías que las superficies de las hojas han desarrollado como consecuencia directa de las adaptaciones funcionales a las condiciones ambientales (Koch *et al.,* 2009). En la Figura 5.34 de la siguiente página, se recogen las estrategias estáticas exploradas en las hojas de plantas de climas templados, con adaptaciones a las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz. La abstracción de las estrategias estáticas encontradas de interés darán lugar al funcionamiento adaptativo estático en la envolvente de climas templados y definirán su diseño adaptativo, a través de la tectónica y la generación de patrones que definan las características morfológicas.

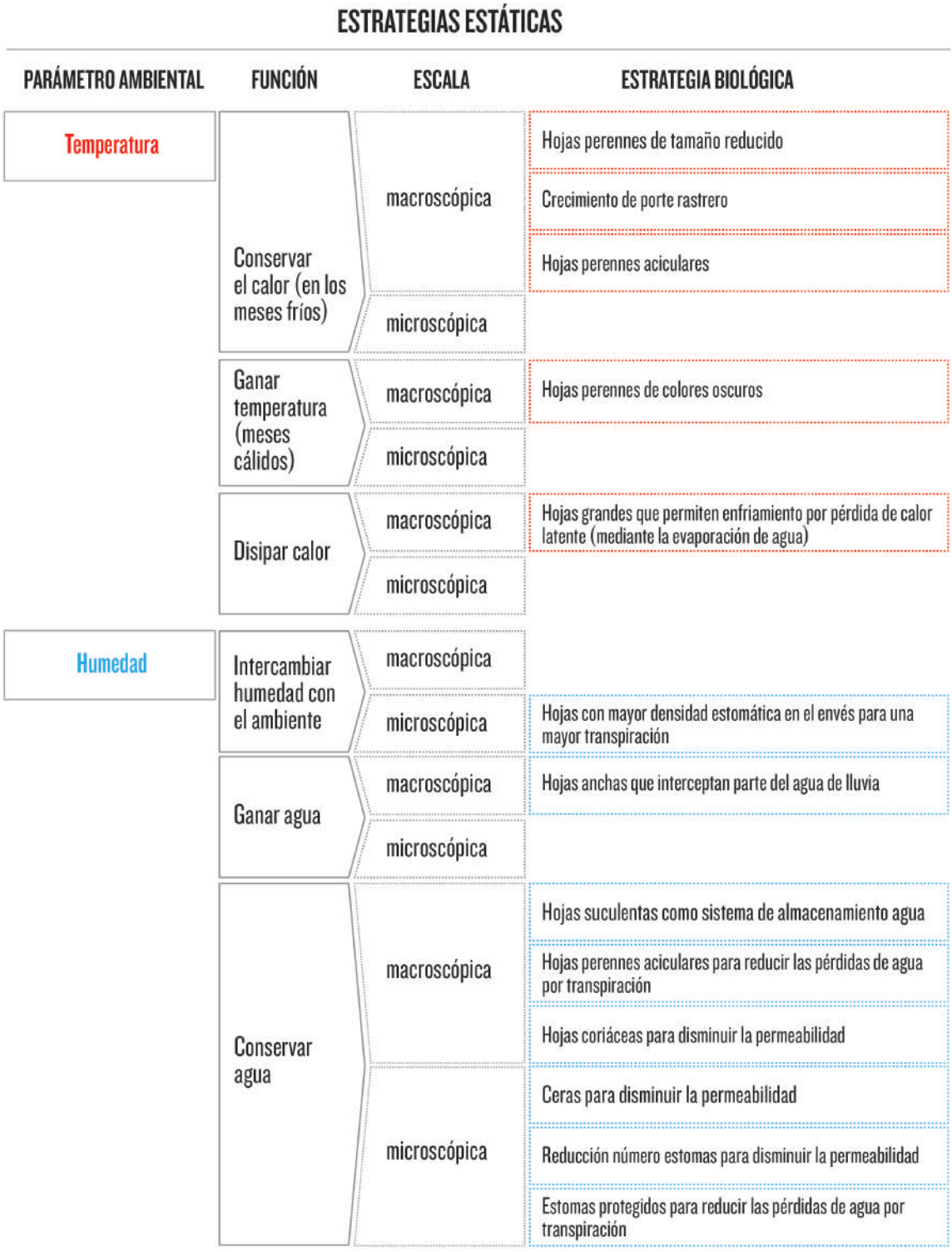


Figura 5.34-A
Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas templados (temperatura y humedad)

Figura 5.34-B
Diagrama estrategias estáticas en plantas de climas templados (luz y dióxido de Carbono)

5.6 Estomas

5.6.1 Valoración

Una vez categorizados diversos ejemplos de adaptación de las hojas de las plantas para una posible aplicación a envolventes arquitectónicas, se han seleccionado los estomas como estructuras de especial interés. La exploración de modelos biológicos ha resultado en una clasificación de los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, donde los estomas toman un protagonismo relevante siendo de especial interés en el proceso de inspiración biomimética. A continuación se sintetiza la presencia de los estomas en la clasificación desarrollada previamente para climas templados:

Estomas como mecanismos dinámicos (MD):

· Función FT3: disipar el calor
· MD: apertura estomática para enfriamiento por evaporación

· Función FH1: intercambiar humedad
· MD: apertura estomática

· FL2: ganar energía luminosa
· MD: movimientos estomáticos de rápida respuesta a los puntos de luz

· Función FG1: captar dióxido de carbono
· MD: apertura estomática

Estomas como estrategias estáticas (EE):

· Función FH1: intercambiar humedad
· EE: aumento densidad estomática para mayor transpiración

· Función FH3: conservar el agua
· EE: reducción densidad estomática para disminuir la permeabilidad
· EE: ceras protegiendo estomas como impermeabilización foliar
· EE: estomas protegidos

· Función FL1: regular la luz
· EE: aumento densidad estomática

· Función FL2: protegerse de la luz
· EE: ceras para reflejar radiación ultravioleta

En los siguientes puntos se muestra un estudio de los estomas en los climas templados a través de diversas plantas representativas, con el objetivo de profundizar en el detalle de su funcionamiento y sus sistemas estructurales para poder transferirlos a la envolvente arquitectónica mediante el funcionamiento adaptativo dinámico y estático (tectónica) y la definición de su diseño adaptativo (características morfológicas).

5.6.2 Estomas como mecanismos dinámicos

En los capítulos previos se ha estudiado cómo los movimientos de apertura y cierre estomáticos están condicionados principalmente por la concentración de agua en la planta y su disponibilidad en el entorno (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Las plantas están absorbiendo y perdiendo agua continuamente. El agua absorbida por las raíces se mueve desde el interior de la planta hacia la atmósfera sobre todo por difusión, por lo que dicho movimiento está controlado por el gradiente de concentración de vapor de agua. Una vez en las hojas, la mayor parte del agua que pierde la planta se evapora desde las hojas a la atmósfera a través de los poros del aparato estomático. Este proceso de pérdida de agua desde la superficie de la hoja se denomina transpiración, y es simultáneo a la absorción del dióxido de carbono necesario para la fotosíntesis (Taiz & Zeiger, 2007).

En las regiones templadas, debido a la elevada humedad atmosférica y la abundante nubosidad, el agua se pierde mucho más lentamente dificultando el proceso de evaporación al encontrarse el aire saturado de agua (Raven *et al.*, 1992). Durante la primavera y el verano, la disponibilidad del agua no supone un problema al que tengan que hacer frente las plantas de los bosques templados. Con la llegada del otoño y durante el invierno, se ha expuesto previamente cómo las mismas plantas presentan mecanismos y estrategias de adaptación para ganar y retener humedad, debido a la falta de agua, las bajas temperaturas y los posibles daños por heladas. Dado que en los capítulos 4 y 6 se estudia el funcionamiento de los movimientos de apertura y cierre estomáticos bajo la influencia de temperaturas extremas y estrés hídrico, en el presente capítulo se analizarán los movimientos estomáticos durante la época del año en la que el la disponibilidad de agua no supone un desafío.

En las plantas de climas templados, los estomas permanecen abiertos durante el día y cerrados por la noche. Durante el período nocturno no se produce actividad fotosintética y por tanto no hay demanda de dióxido de carbono por parte de la hoja. La apertura estomática es pequeña evitando las pérdidas de agua innecesarias. Por el contrario, con la radiación solar diurna se favorece la actividad fotosintética, y aumenta la demanda de dióxido de carbono en el interior de la hoja, por lo que los poros estomáticos se abren (Figura 5.35). En un proceso inseparable, durante esta fase de captación del dióxido de carbono la hoja también pierde vapor de agua por transpiración estomática como se ha expuesto previamente (Martin & Donkin, 1983) (Raven *et al.*, 1992) (Willmer & Fricker, 1996) (Vogel, 2012).

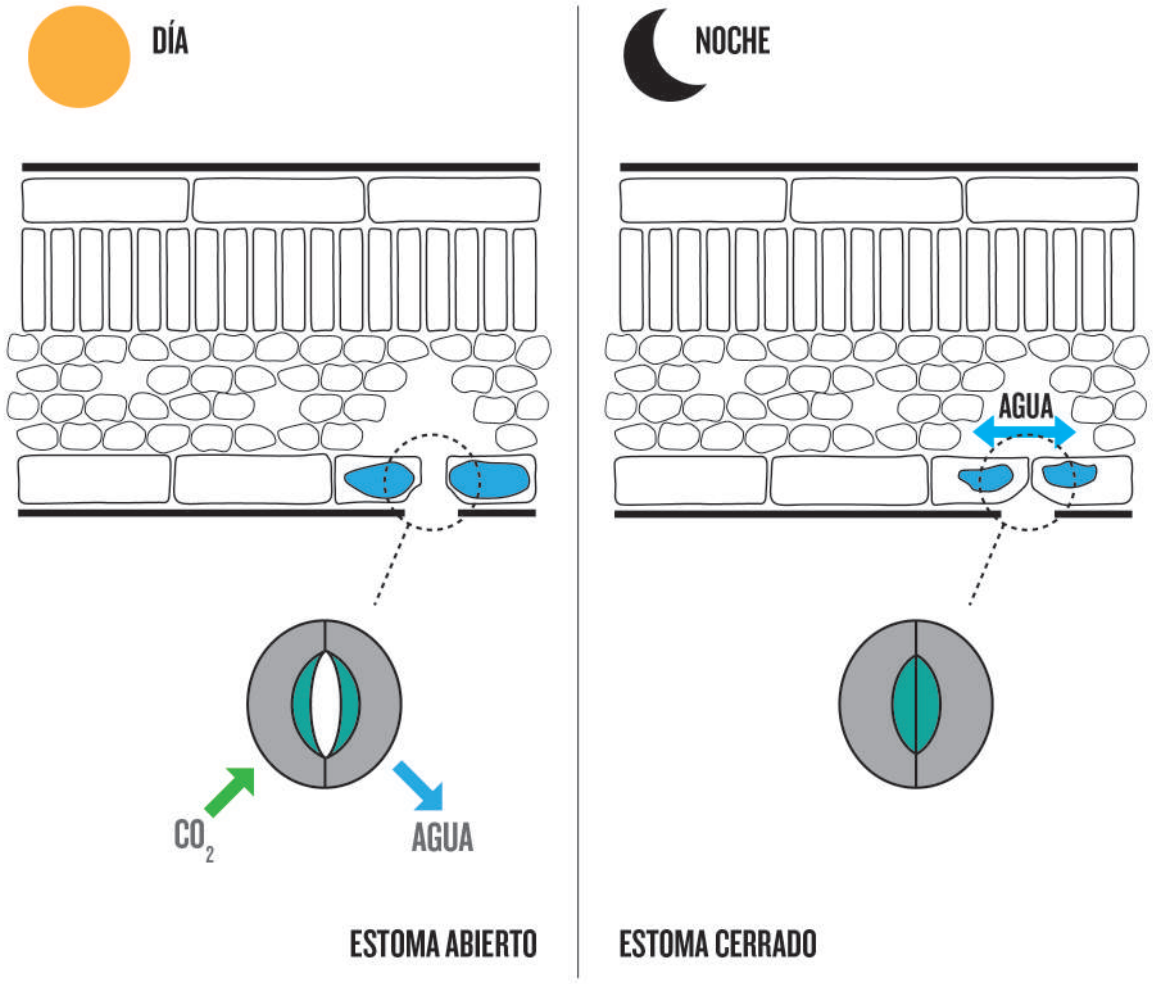


Figura 5.35
Movimientos de apertura y cierre estomáticos.

A pesar de que las aberturas estomáticas ocupan solo alrededor de 1% del total de la superficie de la hoja más del 90% del agua transpirado por la planta se pierde a través de los estomas. El mecanismo de transpiración estomática se realiza a través del aparato estomático (Figura 5.36), el cual está formado por:

- **Cámara subestomática:** cavidad tras el estoma, debajo de la epidermis, cuya función es alojar los gases.

- **Ostíolo:** poro estomático que permite la comunicación entre el ambiente gaseoso del interior de la planta y el exterior.

- **Células oclusivas:** abren y cierran el ostíolo. También llamadas células de guarda. Estas células de paredes elásticas controlan los movimientos de apertura y cierre estomáticos mediante la presión de turgencia, bajo determinadas señales fisiológicas. Al perder su rigidez o turgencia, las células oclusivas se vuelven fláccidas y las paredes alrededor del poro se acercan, cerrándolo. Al contrario, si aumentan su turgencia se hinchan, expandiéndose a lo largo y curvándose alrededor del poro, abriéndolo. La forma en que se curvan queda definida por la morfología de las paredes celulares, parámetro variable entre taxones. En dicha estructura, la disposición de las microfibrillas de celulosa de las paredes celulares ejerce influencia de manera directa en la deformación de expansión, según su disposición sea transversal o radial al eje del poro.

De acuerdo a esta disposición, el mecanismo de transpiración estomática se realiza en dos pasos. El primero consiste en la evaporación del agua de las superficies de las paredes celulares que bordean los espacios intercelulares o aeríferos de la hoja (cámara subestomática). El segundo es la difusión del vapor de agua desde los espacios intercelulares hasta la atmósfera, a través de los estomas (Martin & Donkin, 1983) (Raven *et al.*, 1992) (Willmer & Fricker, 1996) (Taiz & Zeiger, 2007) (Vogel, 2012).

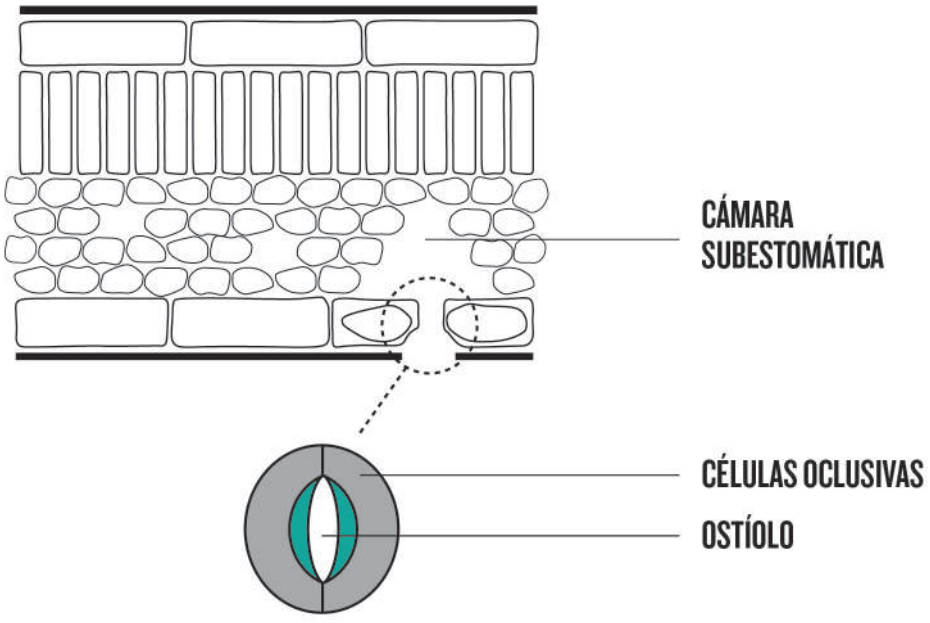


Figura 5.36
Aparato estomático.

5.6.3 Estomas como estrategias estáticas

5.6.3.1 Materiales y métodos

Para el estudio presentado a continuación se examinaron las hojas de tres especies representativas de los climas templados. Todas las muestras fueron tomadas en el Jardín Botánico Atlántico de Gijón, donde se retiró una selección de hojas (Figura 5.37) para cada especie a estudiar, durante los meses de septiembre y octubre del año 2015. Las especies examinadas fueron: *Fagus sylvatica, Quercus petraea* y *Fraxinus excelsior.*

Figura 5.37
Fagus sylvatica, Quercus petraea y Fraxinus excelsior (en orden de izquierda a derecha). Fuente: elaboración propia.

Las tareas de observación y obtención de datos se desarrollaron en los laboratorios de la Facultad de Biología de la Universidad de Oviedo, durante los meses de octubre y noviembre del año 2015. Para la observación y conteo estomático se utilizó el protocolo general para la preparación de tejidos comúnmente usado en laboratorio (Perés-Martínez *et al.*, 2004) (Toral *et al.*, 2010) (Reyes-López *et al.*, 2015), mediante cortes en cuadrados menores a 1 cm^2 con raspado de la superficie para poder observar los estomas con claridad o incluso en algún especimen la extracción de la epidermis con pinzas. Tras estos preparativos se procedió a la colocación de la muestra sobre el portaobjetos, se añadió una gota de agua para su fijación y protegiéndolo con un cubreobjetos se observó al microscopio. Esta operación fue realizada dos veces para cada especie, para la observación de las superficies del haz y del envés de la hoja. El microscopio utilizado fue un microscopio modular manual con cámara digital integral modelo Olympus BX43 y el procesamiento de las imágenes obtenidas se llevó a cabo con el software Olympus CellSens.

5.6.3.2 Observación

El método de análisis consistió en la observación de la muestra aprovechando la gama de objetivos del microscopio: con el aumento de 10x se analizó el patrón de distribución y las estrategias anatómicas, con el aumento 20x se definió el patrón de densidad estomático y por último con el aumento 40x se midió y precisó la geometría de los estomas. A continuación se presentan los datos recogidos de cada especie observada:

MUESTRA 1

Especie: *Fagus sylvatica*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 370mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 35 x 42 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observa la existencia de pelos, situados en los bordes de la hoja.

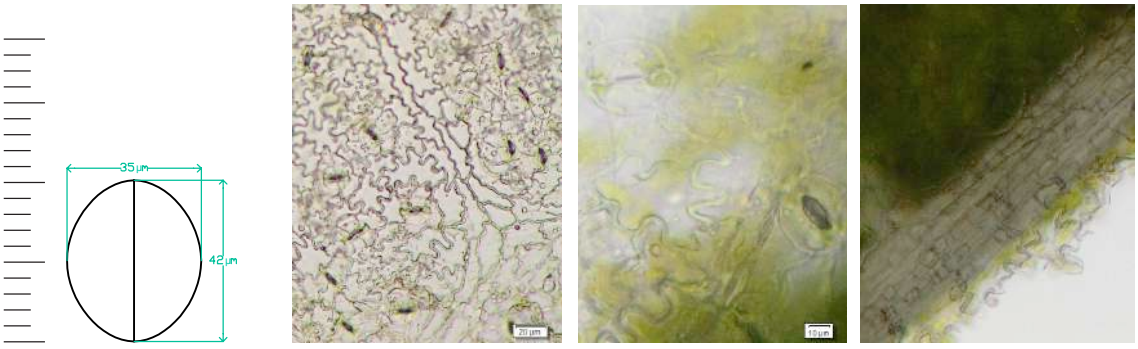


Figura 5.38
Estomas de *Fagus sylvatica:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x), borde (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 2

Especie: *Quercus petraea*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 340mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 33 x 52 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observa la existencia de pelos, situados en los bordes de la hoja.

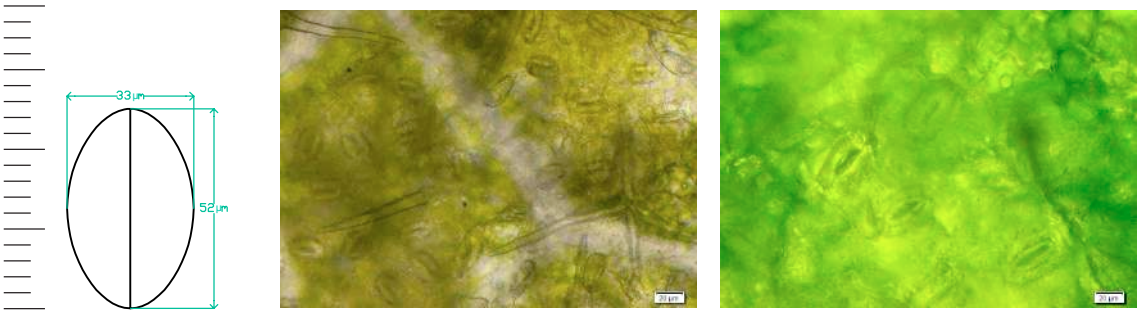


Figura 5.39
Estomas de *Quercus petraea:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 3

Especie: *Fraxinus excelsior*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 95mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 19 x 48 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observa la existencia de pelos, distribuidos sobre los nervios de la hoja.

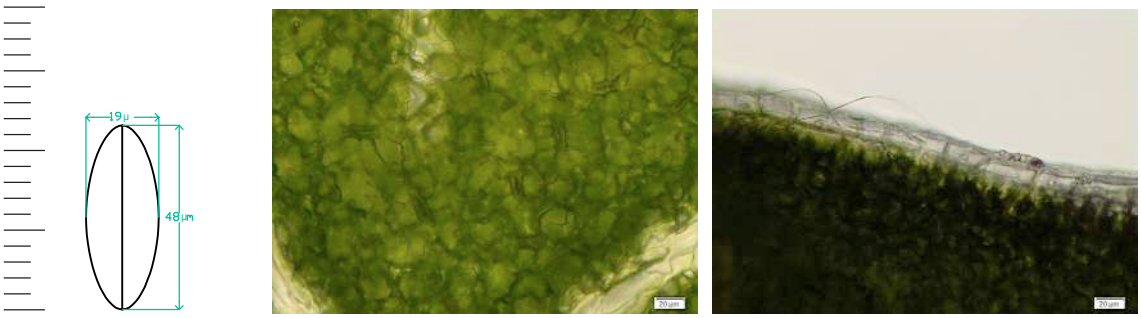


Figura 5.40
Estomas de *Fraxinus excelsior:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). Fuente: elaboración propia.

5.7 La envolvente en climas templados

5.7.1 Parámetros ambientales

Previamente se ha descrito cómo la marcada estacionalidad climática y las condiciones paisajísticas de bosques densos e impenetrables son los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas templados. En función de ello, en el apartado 5.4.1, se detallaron los desafíos de las plantas según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. A continuación de describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de climas templados, de acuerdo a los mismos parámetros (Figura 5.41):

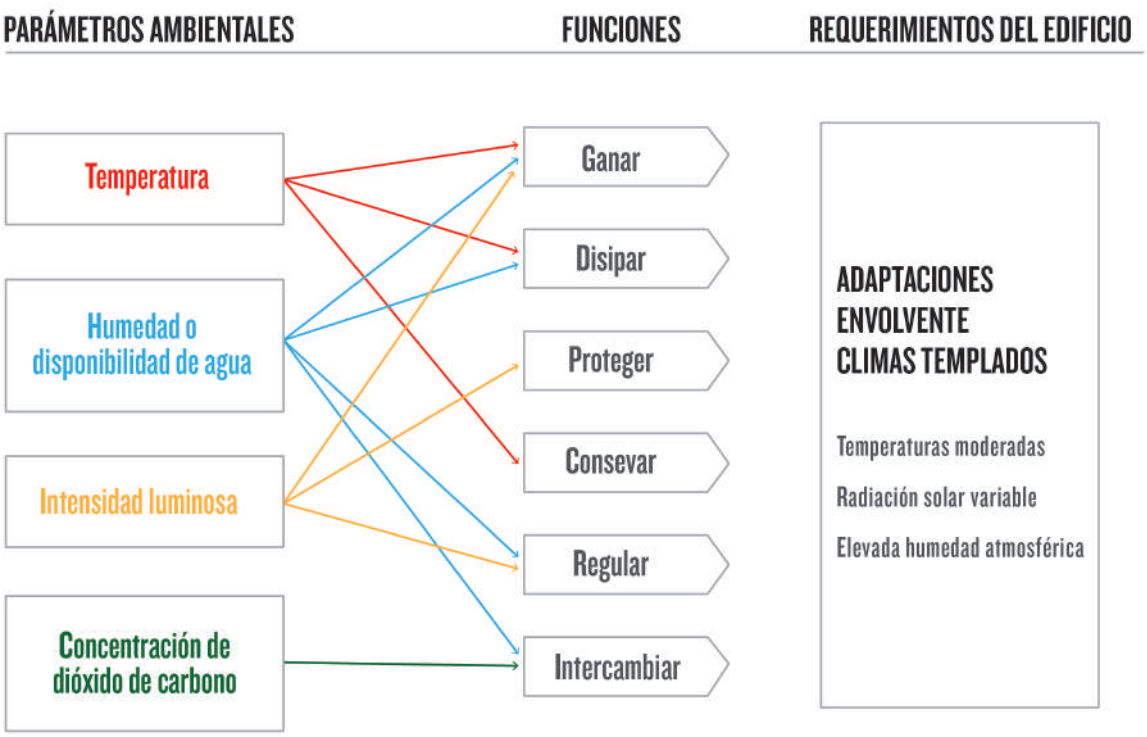


Figura 5.41 Diagrama de los desafíos de las envolventes de las regiones templadas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

- **Temperatura:** en el capítulo 2 se ha explicado la relación de la envolvente con el parámetro ambiental temperatura a través del confort térmico. Tomando como referencia los documentos de los reglamentos estándar como los del CTE, RITE ó los creados por la ASHRAE, la temperatura recomendada en el interior de los edificios se estima en torno a los 20-23ºC en invierno y los 22-27ºC en verano. De acuerdo a los diagramas climáticos adjuntados al comienzo del presente capítulo, se pueden comprobar las temperaturas moderadas del macrobioclima templado, con temperaturas medias anuales entre 9,2ºC en Newcastle y 14ºC en Gijón, por ejemplo. Para estas mismas ciudades, la temperatura media de las máximas del mes más cálido del año registran unos valores de 17,8 ºC en Newcastle y 22,7ºC en Gijón. Y la temperatura media de las mínimas del mes más frío del año registran unos valores de 2,8 ºC en Newcastle y 6,1ºC en Gijón. Por tanto, aunque no se registran valores térmicos extremos ni dominantes, como en los casos de los climas fríos o cálidos, se preven necesarias diferentes estrategias de adaptación a la oscilación de temperaturas según la época del año o el grado de continentalidad, con el objetivo de lograr y mantener los niveles de confort térmico en los espacios habitables.

· **Humedad:** de acuerdo con el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016), las condiciones interiores de humedad relativa se establecen entre los valores 45-60% en verano y 40-50% en invierno. Las regiones de climas templados generalmente se tratan de regiones húmedas con precipitaciones importantes en torno a los 500-1000mm anuales, distribuidas a lo largo de todo el año, lo que genera una atmósfera húmeda. Además la abundante nubosidad dificulta la evaporación y hace que se reduzca la amplitud térmica diaria. Por tanto, la envolvente de climas templados desarrollará estrategias de adaptación de acuerdo a los diferentes niveles de humedad relativa con el objetivo de regular la calidad del aire interior.

· **Luz:** la luz solar tiene influencia directa en el comportamiento lumínico y térmico del edificio, y en consecuencia sobre las demandas para alcanzar los respectivos niveles de confort. En los climas templados la radiación es menor en los meses de invierno y mayor en los de verano, lo que supone un desafío para la envolvente como reguladora del confort lumínico interior. Este desafío cambiante según las diferentes épocas del año se deberá resolver mediante estrategias de adaptación para captar y absorber la luz en los meses de menor radiación solar, y a su vez estrategias para reflejar la luz o generar zonas sombreadas cuando la exposición solar sea mayor, evitando el conflicto entre ambos requerimientos.

· **Dióxido de carbono:** en el capítulo 2 se ha explicado la relación de la envolvente con el parámetro ambiental dióxido de carbono a través de la calidad del aire interior. De acuerdo a las recomendaciones para satisfacer las condiciones de bienestar en el edificio recogidas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016) se establecen unos valores para el dióxido de carbono de entre 500 y 800 ppm (partes por millón). Tal y como exige el Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (DB-HS, 2016) se dispondrán medios para ventilar los espacios interiores adecuadamente eliminando los contaminantes habituales producidos durante el uso normal de los edificio. En las regiones de climas templados, el desafío para la envolvente será proporcionar una adecuada calidad del aire interior mediante estrategias de adaptación para ventilar, evitando el conflicto entre el intercambio de aire con el exterior y las posibles pérdidas de calor durante los meses más fríos; o las ganancias térmicas y de humedad durante los meses más cálidos.

5.7.2 Adaptabilidad

En las regiones de climas templados, la envolvente hará frente a las condiciones de temperaturas moderadamente frías en invierno y cálidas en verano, radiación solar variable (mayor en verano que en invierno) y elevada humedad atmosférica, a través de la adaptabilidad. Dicha adaptabilidad se alcanzará mediante estrategias de captación de la radiación solar y conservación del calor en el interior durante los meses fríos; protección de las ganancias solares y extracción del calor generado en el interior por enfriamiento durante los meses cálidos; y ventilación para mantener la calidad del aire interior. Cabe aclarar que en los climas templados, no se requieren estrictamente estrategias de protección de las ganancias solares y extracción del calor interior, pues los periodos de calor durante el verano no son demasiado largos.

También, es importante señalar que la condición de elevada humedad atmosférica que ofrece el clima templado supone una oportunidad más que un problema. Así, se identifican las abundantes precipitaciones distribuidas a lo largo de todo el año y la atmósfera húmeda, como el potencial del entorno climático templado. Y se valora este potencial para el desarrollo de estrategias de recogida y almacenamiento de agua, que puede contribuir a las demandas de agua en el interior del edificio. En el siguiente diagrama (Figura 5.42) se sintetizan los procesos a desarrollar por la envolvente de acuerdo a las funciones definidas para hacer frente a los desafíos de las regiones de climas templados.

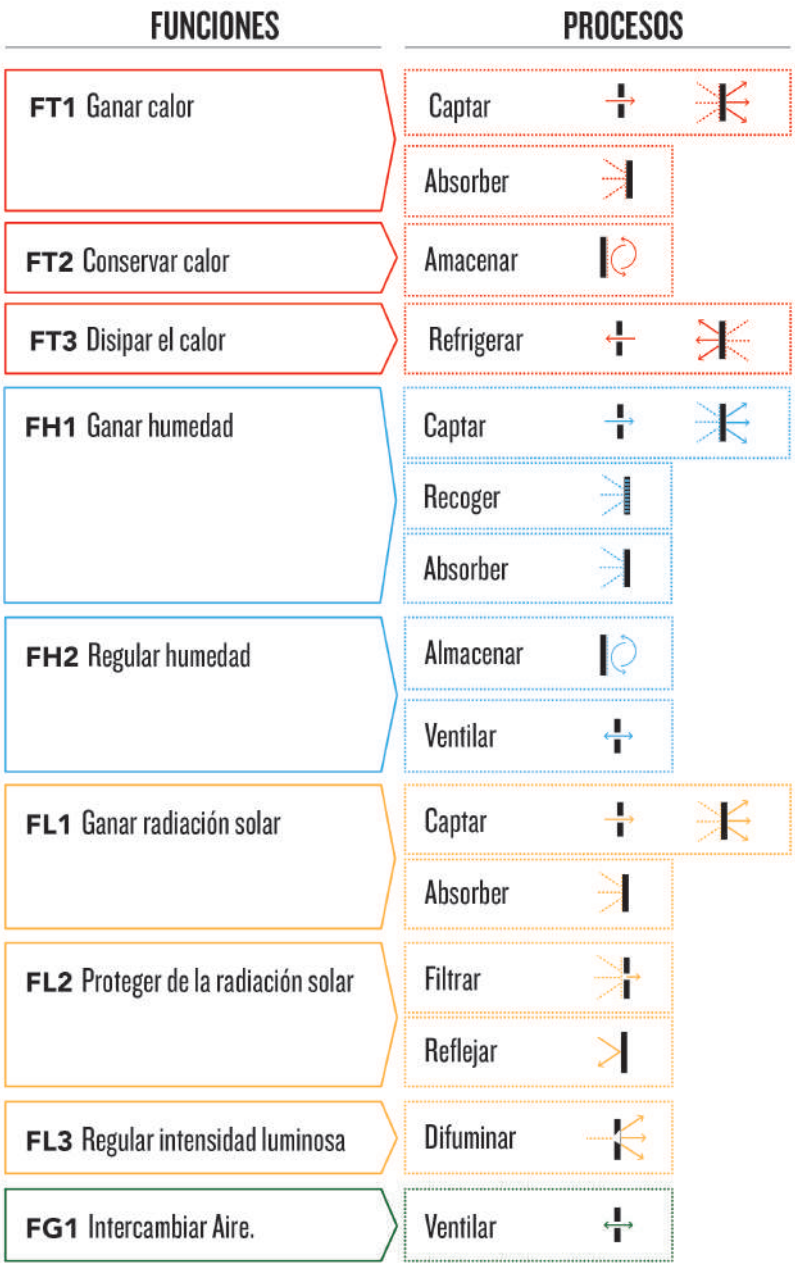


Figura 5.42 Diagrama de las funciones a desarrollar por la envolvente de acuerdo a los desafíos definidos en las regiones de climas templados.

5.7.3 Soluciones existentes

La mayoría de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en los climas templados, se resuelven mediante la combinación de estrategias opuestas dependiendo de la época del año:

Invierno

Durante el invierno, para hacer frente a las temperaturas moderadamente frías y la menor radiación solar, la adaptabilidad de la envolvente se alcanzará mediante estrategias de captación de la radiación solar y conservación del calor en el interior. Generalmente, esto se resuelve mediante materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para calentar la temperatura ambiente. Tal y como se ha detallado en el capítulo 4, las soluciones comunes para hacer frente a las bajas temperaturas exteriores y lograr el confort térmico interior consisten en sistemas de calentamiento del aire, mediante radiadores; sistemas de calefacción por suelo radiante; convectores de emisión de calor por convección; o sistemas de aire acondicionado.

Respecto a la humedad, la envolvente debe evitar el conflicto entre la regulación de los niveles de humedad y las posibles pérdidas de calor. En el capítulo previo se ha explicado cómo la envolvente es considerada como una barrera térmica que debe evitar la pérdida de calor mediante el aislamiento para conservar las ganancias térmicas interiores. Esto mejora la hermeticidad del aire, reduciendo el calentamiento necesario y contribuyendo así a una disminución en el consumo de energía. Sin embargo, dicha hermeticidad puede provocar problemas de condensación. La condensación es el fenómeno físico por el cual el vapor de agua contenido en el aire se transforma en líquido al entrar en contacto con una superficie fría (Figura 5.43). Si no se regula el exceso de vapor de agua, éste termina saturando el ambiente. Las soluciones comunes para regular los niveles de humedad en el interior, consisten en tecnologías de tratamiento del aire y deshumidificación (Figura 5.43). Estos sistemas no contribuyen a reducir la demanda energética en los edificios, sino que la aumentan. Además de generar problemas de ruido que pueden disminuir la satisfacción de los ocupantes. Esto sugiere, que a pesar del requerimiento de mantener el calor, la ventilación a través de la envolvente, mediante un sistema que minimize las pérdidas de calor, es importante para lograr la calidad del aire interior en cuanto a niveles de humedad relativa se refiere.

Figura 5.43 Condensación sobre la superficie interior de la ventana y aparato deshumidificador. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Verano

Durante el verano, para hacer frente a las temperaturas moderadamente cálidas y la mayor radiación solar, la adaptabilidad de la envolvente se alcanzará mediante estrategias de protección de las ganancias solares y extracción del calor generado en el interior por enfriamiento. Aunque, en los climas templados no se requieren estrictamente estrategias de protección de las ganancias solares y extracción del calor interior, pues los periodos de calor durante el verano no son demasiado largos. En el próximo capítulo, dedicado a los climas cálidos, se detallarán las soluciones comunes para hacer frente a dichos desafíos, mediante elementos mecánicos de protección solar, materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para enfriar la temperatura ambiente y disipar así el exceso de calor.

Además de la adaptabilidad a las condiciones de temperatura, radiación solar y humedad, la condición de elevada humedad atmosférica que ofrece el clima templado supone una oportunidad para el diseño de envolventes que funcionen como colectores de agua. La recolección del agua de lluvia para su reutilización en los edificios ha sido investigado por diversos autores (Herrmann & Schmida, 1999) (Al-Jayyousi, 2003) (Badarnah, 2012). Generalmente la innovación en diseños para la obtención de agua y su aprovechamiento se focaliza en las regiones de climas cálidos, donde los recursos hídricos son más limitados y suponen mayor desafío. Sin embargo, dadas las abundantes precipitaciones distribuidas a lo largo de todo el año y la atmósfera húmeda registradas en el entorno climático templado, se identifican dichas características como una oportunidad de diseño. Y se valora este potencial para el desarrollo de estrategias de recogida y almacenamiento de agua a través de la envolvente, aprovechando la gran superficie expuesta que ésta supone en el edificio. Por todo ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas templadas definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas. En los próximos apartados se darán las claves para la transferencia de los principios biológicos a los requerimientos constructivos mediante la generación de diseños conceptuales de envolvente para climas templados.

Haciendo un repaso de la metodología "De las plantas a la arquitectura" (Figura 5.44), se aprecia cómo a lo largo del capítulo se ha completado la Fase 1-Biología, y de la Fase 2-Transición se ha ido desarrollando la sub-fase "Abstracción" y la sub-fase "Valoración". Respecto a esta última, durante este apartado (5.7.2-La envolvente en climas templados), se han descrito los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de climas templados, de acuerdo a los diferentes parámetros ambientales y se han sintetizado los procesos a desarrollar por la envolvente. También, se ha hecho un repaso de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en dichas zonas. En el próximo apartado (5.8 Generación diseños conceptuales) se darán las pautas para transferir los principios biológicos extraídos de las plantas a los requerimientos constructivos de la envolvente. Finalmente, en el apartado 5.9 se abordará la Fase 3-Arquitectura, mediante el desarrollo de un caso de diseño teórico de envolvente para climas templados.

Figura 5.44
Diagrama de flujo de la metodología "De las plantas a la arquitectura"

5.8 Generación de diseños conceptuales

5.8.1 Matriz de diseño

La generación de diseños conceptuales se aborda desde las nueve funciones definidas que la envolvente de climas templados tiene que desarrollar para hacer frente a los desafíos de temperaturas moderadamente frías en invierno y cálidas en verano, radiación solar variable (mayor en verano que en invierno) y elevada humedad atmosférica. Las funciones (F) son: ganar, conservar y disipar el calor, ganar y regular la humedad, ganar y proteger de la radiación solar, regular la intensidad luminosa e intercambiar aire con el exterior. Para cada función se presenta uno o más procesos (P) arquitectónicos a desarrollar por la envolvente para lograr la adaptabilidad al medio templado. Para los 15 procesos arquitectónicos expuestos se proponen diversos procesos biológicos de adaptación. La matriz de diseño resultante propone 11 mecanismos dinámicos (MD) y 16 estrategias estáticas (EE), haciendo un total de 27 posibles procesos biológicos como soluciones de aplicación. A continuación se representa dicha matriz de forma visual en la Figura 5.45

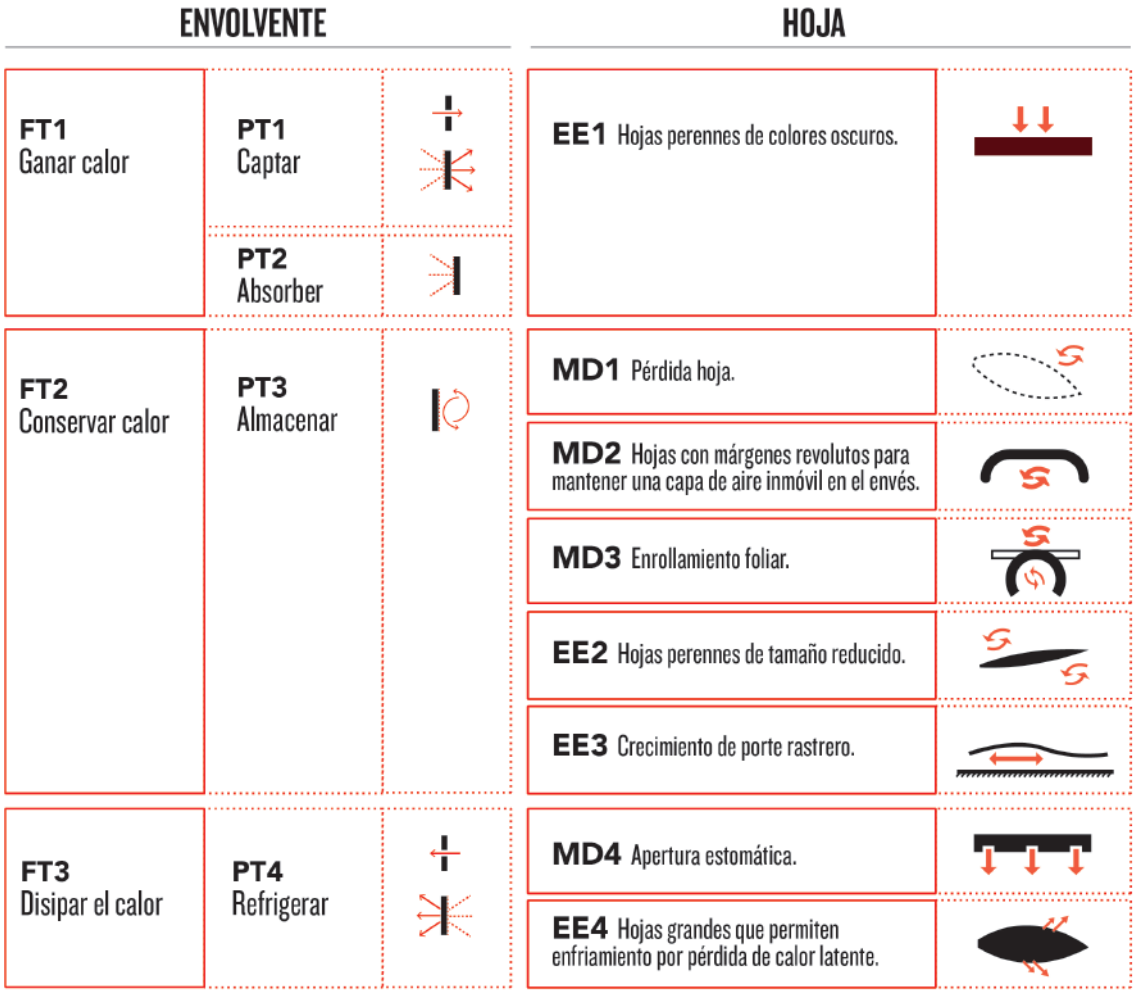


Figura 5.45-A
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas templados. (Temperatura)

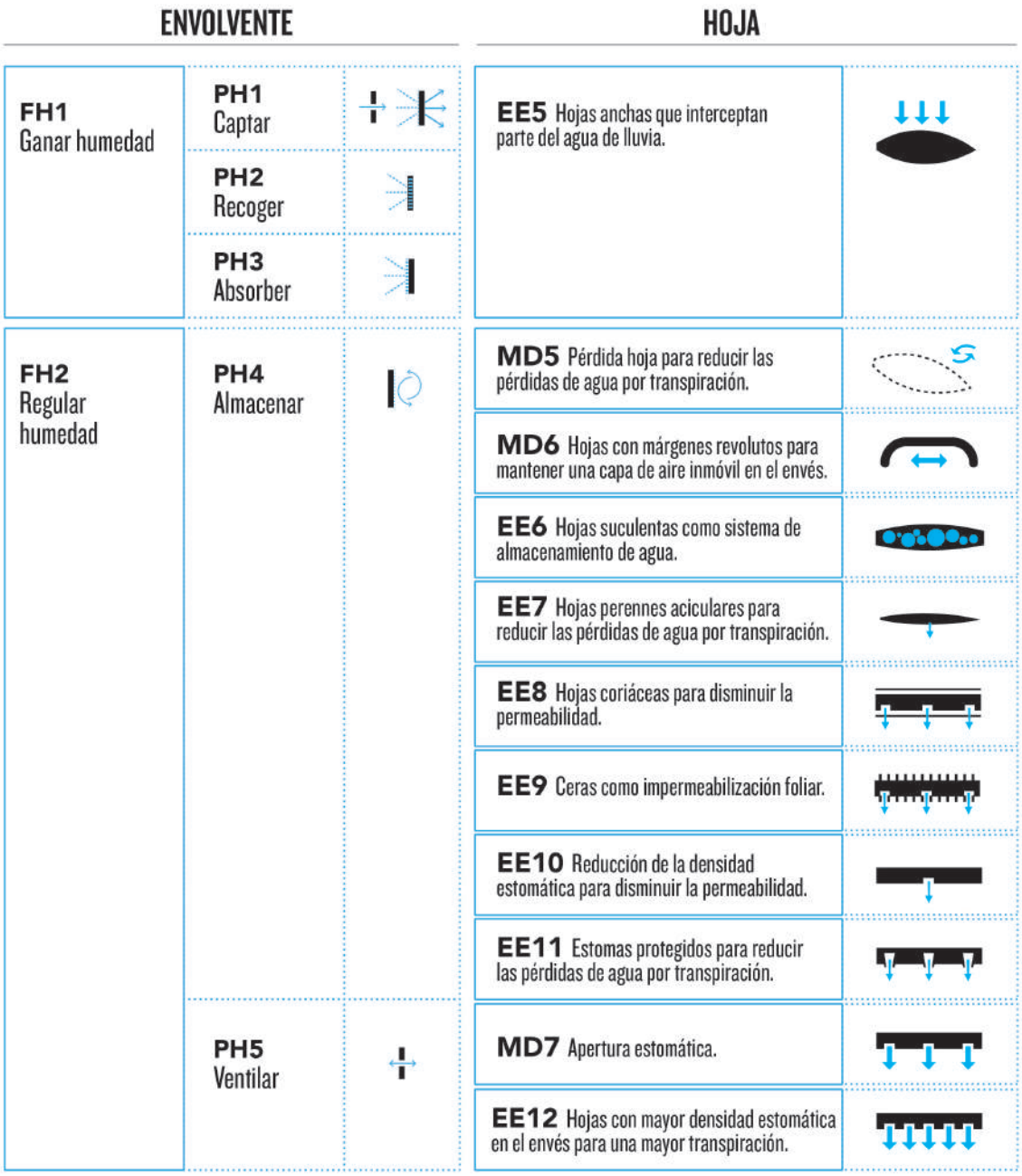


Figura 5.45-B
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas templados. (Humedad)

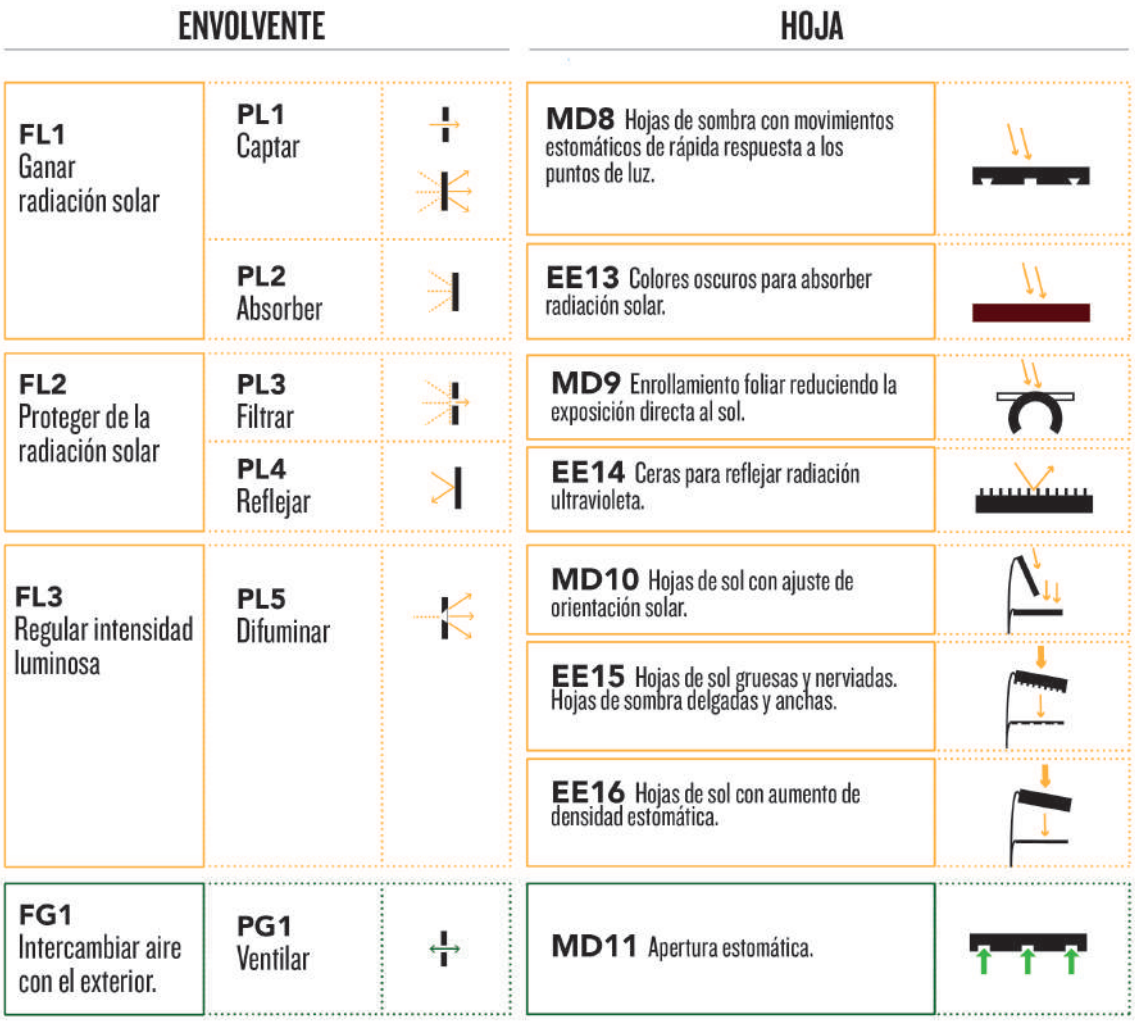


Figura 5.45-C
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas templados.
(Luz y dióxido de carbono)

5.8.2 Valoración del diseño conceptual

Como se ha explicado previamente, la adaptabilidad frente a las condiciones de temperatura y radiación solar se abordan en los capítulos 4 y 6, desarrollando en el presente capítulo la adaptabilidad a las condiciones de elevada humedad atmosférica. Por tanto, para la generación del diseño conceptual de envolvente en climas templados se aborda el desafío de la elevada humedad atmosférica, mediante la selección de las funciones FH1 (ganar humedad) y FH2 (regular humedad) en la matriz de diseño definida previamente. La matriz indica 3 mecanismos dinámicos y 8 estrategias estáticas relevantes para la generación del diseño conceptual:

Mecanismos dinámicos:

· MD1: pérdida hoja para reducir las pérdidas de agua por transpiración.
· MD2: hojas con márgenes revolutos para mantener una capa de aire inmóvil en el envés.
· MD3: apertura estomática para intercambio de humedad con el exterior.

Estrategias estáticas:

· EE1: hojas anchas que interceptan parte del agua de lluvia.
· EE2: hojas suculentas como sistema de almacenamiento agua.
· EE3: hojas perennes aciculares para reducir las pérdidas de agua por transpiración.
· EE4: hojas coriáceas para disminuir la permeabilidad.
· EE5: ceras como impermeabilización foliar.
· EE6: reducción densidad estomática para disminuir la permeabilidad.
· EE7: estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración.
· EE8: hojas con mayor densidad estomática en el envés para una mayor transpiración.

Se propone, como ejemplo de envolvente en climas templados, un caso de diseño de recogida del agua exterior y de regulación de la humedad del interior. El sistema de captación y almacenamiento de la humedad exterior puede contribuir a las demandas de agua en el interior del edificio. La regulación de los niveles de humedad en los espacios interiores se realiza mediante un sistema de ventilación pasiva, evitando así los problemas de condensación causados por exceso de humedad. Para ello, se seleccionan los siguientes MD y EE como características dominantes que proporcionan pautas para la generación de tal diseño conceptual:

· apertura estomática para intercambio de humedad con el exterior.
· hojas con márgenes revolutos para mantener una capa de aire inmóvil en el envés.
· estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración.

Tal y como se ha explicado en la Figura 5.44, una vez finalizada la Fase 2-Transición, el siguiente paso de la metodología “De las plantas a la arquitectura” es la implementación técnica, la cual se desarrolla en la Fase 3-Arquitectura. En el próximo apartado (5.9) se presenta un caso de diseño teórico, mediante la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos, con el objetivo de validar la metodología propuesta.

5.9 Caso de diseño 2

El caso de diseño supone el primer paso en la tarea de implementación técnica, y se aborda desde la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. La traducción gráfica abstracta incorpora la adaptabilidad de la envolvente por medio del funcionamiento adaptativo (FAD y FAE) y del diseño adaptativo (Figura 5.46). En los próximos apartados se desarrollará cada uno de ellos.

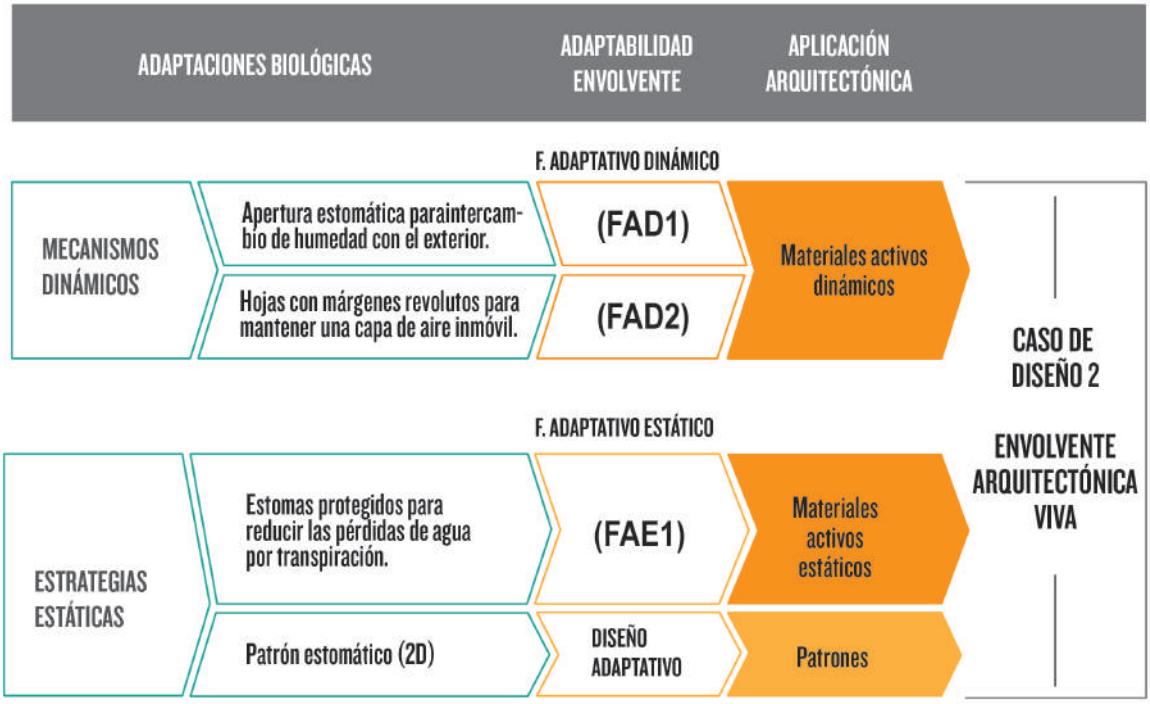


Figura 5.46 Diagrama de la adaptabilidad de la envolvente en el Caso de diseño 2

5.9.1 Funcionamiento adaptativo

El funcionamiento adaptativo de la envolvente se define como su capacidad de reaccionar y mutar ante los estímulos exteriores que la solicitan. Puede desarrollarse de una forma dinámica (FAD) o estática (FAE). En el "Caso de diseño 2" presentado, el mecanismo dinámico de apertura estomática se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo de ventilación para regulación de los niveles de humedad interiores.

Adicionalmente el otro mecanismo dinámico seleccionado (hojas con márgenes revolutos), combinado con la estrategia estática de estomas protegidos, se traduce gráficamente, y también de forma abstracta, en un sistema de captación del agua exterior. En la Figura 5.47 se muestra la representación gráfica abstracta del diseño conceptual.

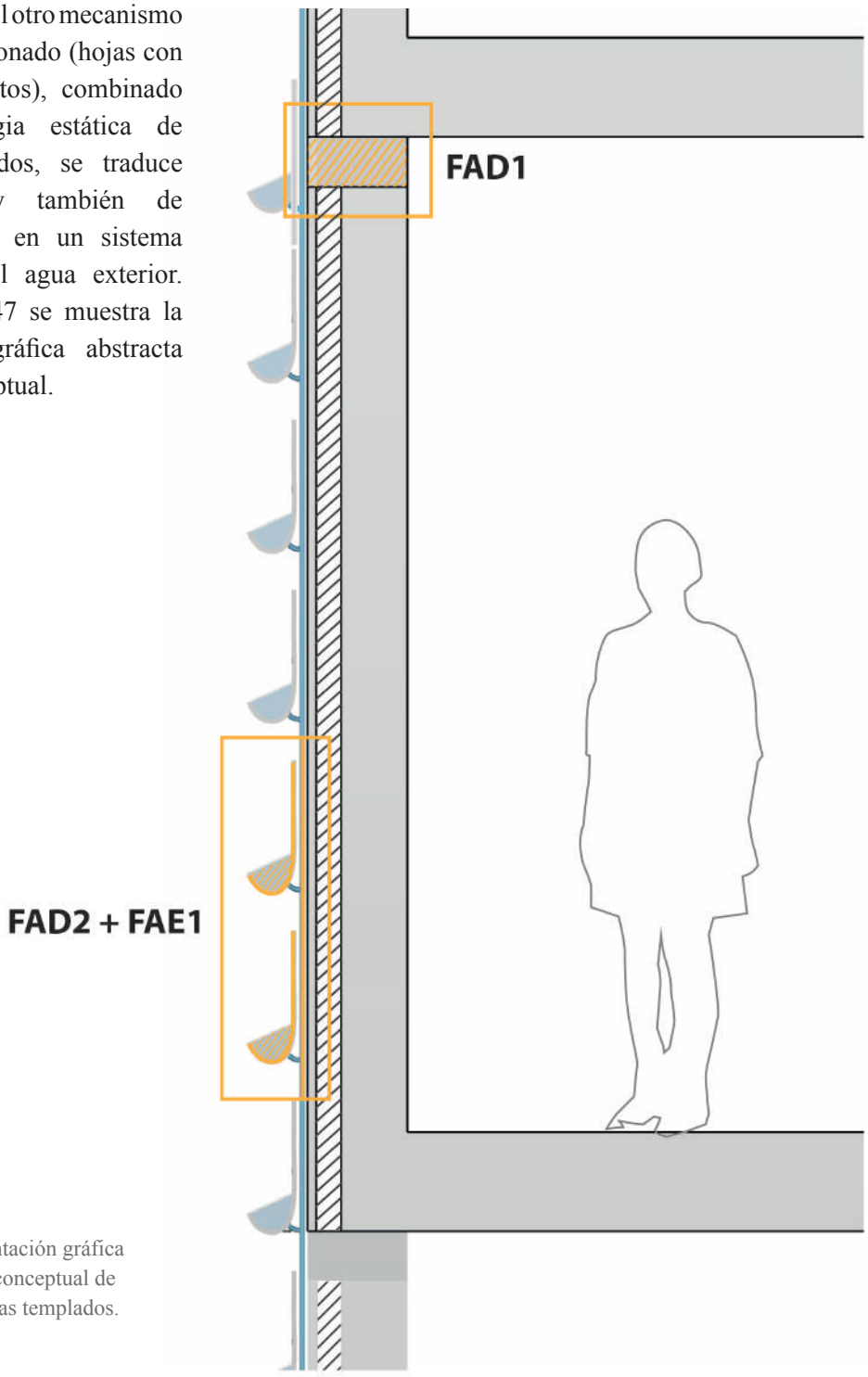


Figura 5.47 Representación gráfica abstracta del diseño conceptual de envolvente para climas templados.

El diseño creado se descompone en tres adaptaciones que trabajan de forman conjunta para hacer frente mediante la adaptabilidad a los desafíos de elevadas temperaturas e intensa radiación solar. A continuación se detalla cada una de ellas:

· **Funcionamiento adaptativo dinámico 1 (FAD1):** este tipo de adaptabilidad se alcanza por medio de mecanismos estructurales reactivos, es decir aquellos en los que se observa cierto tipo de movimiento que da lugar a cambios en la configuración de la envolvente por medio de partes móviles. El mecanismo dinámico de apertura estomática para intercambio de humedad con el exterior se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo reactivo de ventilación como proceso que regula los niveles de humedad interiores (Figura 5.48). La demanda de la energía requerida para mantener el ambiente interior a cierta temperatura en invierno se incrementa si aumenta la pérdida de calor por transmisión en la envolvente o si aumenta la pérdida por ventilación. Así, durante los meses fríos se evita la ventilación a través de las ventanas y con ello se impide la evacuación de la humedad interior, dando lugar a problemas de condensación. Una de las recomendaciones para evitar la condensación superficial e intersticial es extraer la humedad producida en el interior mediante la ventilación, pues el control de humedad limita las posibilidades de condensación en la envolvente. (Bustamante, 2009) (DB-HS, 2016). Por todo esto, se plantea el FAD1 como un sistema con capacidad de expandirse y abrirse para posibilitar la salida de vapor de agua aire hacia el exterior del edificio. Mediante este mecanismo se pretende asegurar la ventilación necesaria para limitar el contenido de vapor de agua, especialmente en períodos fríos del año. Y con ello dar solución a los problemas de condensación los cuales provocan daños en los sistemas constructivos, reduciendo su durabilidad y facilitando la presencia de moho en la superficie interior (Bustamante, 2009). El mecanismo proyectado consiste en una membrana permeable y elástica, la cual se abre o se cierra mediante un sistema de válvulas, cuyo mecanismo reacciona bajo cambios en la presión de turgencia al igual que los estomas. A través de esta membrana reactiva se expulsa el exceso de humedad por difusión, manteniendo el aire en un estándar de confort con un mínimo consumo energético y evitando así ventilar más de lo necesario para no aumentar la demanda de energía de calefacción.

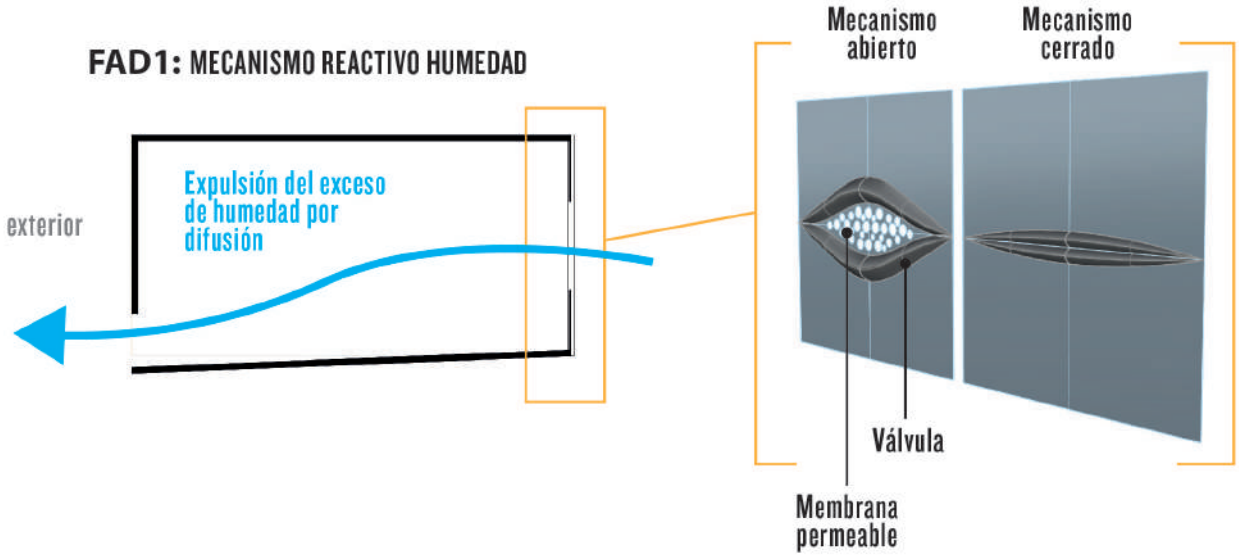


Figura 5.48 FAD1

· **Sistema compuesto por (FAD2) + (FAE1)**

· **Funcionamiento adaptativo dinámico 2 (FAD2):** al igual que en el FAD1, este tipo de adaptabilidad se alcanza por medio de mecanismos estructurales reactivos, es decir aquellos en los que se observa cierto tipo de movimiento que da lugar a cambios en la configuración de la envolvente por medio de partes móviles. El mecanismo dinámico de hojas con márgenes revolutos se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo reactivo de captación del agua exterior (Figura 5.49). La superficie externa del diseño, responsable de la ganancia de agua, adapta las características morfológicas de las hojas con márgenes revolutos. De este modo, al entrar en contacto con la lluvia, la superficie curva sus bordes de tal manera que genera una superficie cóncava para la recolección de agua. Una vez recogida, se procede a la canzalización del agua (FAE1).

· **Funcionamiento adaptativo estático 1 (FAE1):** en este caso, la adaptabilidad propuesta consiste en la canalización del agua captada mediante el FAD2 para su acumulación. Una vez almacenada, se distribuiría hacia los puntos de demanda del edificio. Para la canalización del agua recogida se plantea una solución de conductos resguardados, tomando como inspiración las morfologías de estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración. La estrategia biológica de los estomas hundidos se traduce gráficamente, y de forma abstracta, en la geometría de la sección del sistema de recolección mediante los conductos protegidos del exterior, mediante una membrana permeable y elástica. El transporte hacia las cámaras de almacenamiento se realiza a lo largo de unos tubos exteriores a la envolvente hasta las cotas más bajas del edificio (Figura 5.49).

Figura 5.49 FAD2 + FAE1

La materialización de los funcionamientos adaptativos expuestos (FAD1 y FAD2+FAE1) en implementaciones técnicas, tal y como se ha explicado en el capítulo 2, será posible a través de los materiales activos. Por ello, se estudian diversos materiales activos para su posible aplicación en el diseño conceptual presentado. A continuación se presenta un listado de posibles materiales activos y la realización de algunos experimentos:

5.9.1.1 Materiales activos dinámicos

La implementación técnica del FAD1 y FAD2 se desarrollará mediante el uso de materiales activos dinámicos, en los que cierto tipo de movimiento es observable a simple vista. Los mecanismos de captación de humedad se materializarán a través de configuraciones materiales que le permitan doblarse, rotar o curvarse para posibilitar la entrada y salida de aire entre el exterior y el interior del edificio. Los materiales activos dinámicos buscados son aquellos reactivos al dióxido de carbono, que darán lugar a cambios reversibles en la configuración de la envolvente por medio de sistemas capaces de abrirse y cerrarse, a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material, sin necesidad de estímulos eléctricos.

· **Materiales reactivos a la humedad**

· **Madera:** la madera es un material tradicional, sin embargo lo incluimos en esta lista debido a sus propiedades de higroscopicidad y anisotropía, que convierten la madera en un material reactivo a la humedad. La madera es una estructura celular y siempre busca alcanzar la humedad de equilibrio, que es la humedad contenida en un material higroscópico según una temperatura y humedad relativa definidas. Debido a esto, la madera está respondiendo continuamente a cambios en la humedad relativa, dando como resultado un movimiento dimensional constante (Menges, 2012). El pabellón *"HygroSkin"*, estudiado en el capítulo 2, desarrolla un sistema arquitectónico de respuesta autónoma a través del uso de la madera como material meteorosensible usando sus propiedades higroscópicas (Reichert *et al.*, 2014). Éste proyecto demuestra el potencial, en términos de eficiencia energética, de desarrollar una envolvente adaptativa que no requiere ningún equipo sensorial o estímulo eléctrico, basándose en el movimiento de los conos de pícea (*Picea*) como principios biomiméticos.

· **Hidrogel: s**e trata de un gel inteligente basado en una red insoluble de cadenas de polímero que se hinchan cuando se añade agua. Los hidrogeles son altamente absorbentes, pueden almacenar grandes cantidades de agua, y al mismo tiempo poseen un grado de flexibilidad muy similar al tejido natural, debido a su contenido de agua. Ésto hace que el hidrogel se hinche cuando absorbe agua, reteniéndolo y aumentando así de forma considerable su volumen pero manteniendo su forma. Aunque el uso de este tipo de material varía ampliamente, con aplicaciones al ámbito médico, fármacos o productos comerciales (Yu *et al.*, 2016), apenas está por explorar en el sector de la construcción. Algunos proyectos han investigado, a nivel teórico, su uso para la termoregulación en edificios, como el caso de "Hidrocerámica" (HIDROCERAMICS, 2015). Éste estudio aborda los procesos termodinámicos en edificios de una forma pasiva mediante la creación de un sistema compuesto por hidrogel y cerámica. El sistema creado, sensible a la temperatura y humedad, permite la evapotranspiración pasiva en la envolvente, la cual enfría el espacio interior 5 ºC.

En la Figura 5.50 se presentan algunas imágenes de experimentos realizados con hidrogel en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la Universidad de Oviedo, en el año 2015. Los resultados obtenidos muestran un aumento de volumen del 700%, desde el material seco hasta alcanzar el 100% de humedad relativa, en un intervalo de 6 horas.

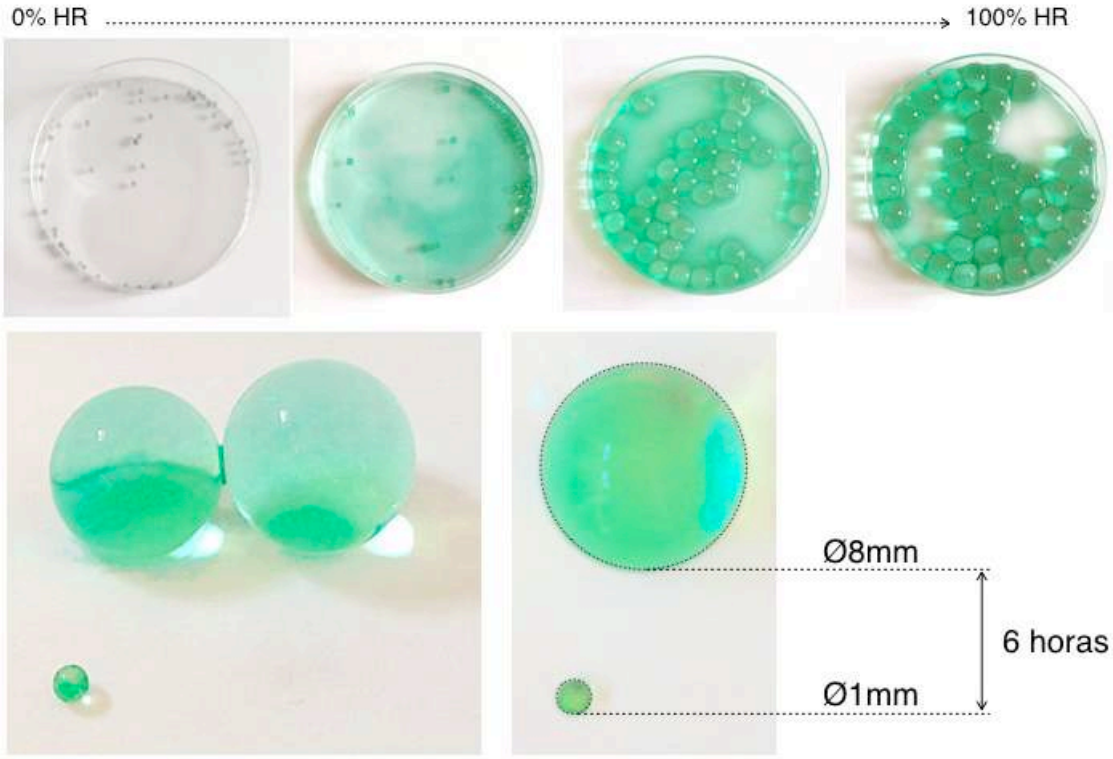


Figura 5.50 Experimentos con hidrogel

5.9.2 Diseño adaptativo

En el apartado 5.6.3 se ha iniciado el proceso de exploración de los patrones estomáticos de las plantas más representativas de las regiones templadas. Y aunque se ha observado cierto potencial en los patrones de los estomas (Figura 5.51) como herramienta para crear patrones innovadores para las envolventes de edificios, a través de la proporción de opacidad y transparencia en su superficie, aún no se han alcanzado resultados satisfactorios para la generación de patrones para envolventes arquitectónicas.

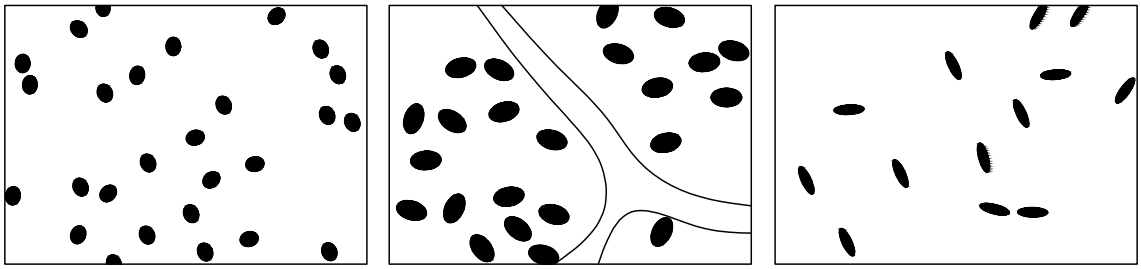


Figura 5.51 Patrones estomáticos de las plantas seleccionadas en climas templados.

Por ello se considera como un posible desarrollo futuro continuar con la exploración de los patrones estomáticos con el objetivo de extraer parámetros aplicables al diseño adaptativo de envolventes. Así, además de mediante el funcionamiento adaptativo, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a través de patrones definidos como criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño.

5.10 Conclusiones

La mayoría de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en los climas templados, se resuelven mediante la combinación de estrategias opuestas dependiendo de la época del año. Durante el invierno, para hacer frente a las temperaturas moderadamente frías y la menor radiación solar, se adoptarán estrategias de captación de la radiación solar y conservación del calor en el interior. Generalmente, esto se resuelve mediante materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para calentar la temperatura ambiente, tema abordado en el capítulo 4. Durante el verano, para hacer frente a las temperaturas moderadamente cálidas y la mayor radiación solar, se adoptarán estrategias de protección de las ganancias solares y extracción del calor generado en el interior por enfriamiento. Aunque, en los climas templados no se requieren estrictamente estrategias de protección de las ganancias solares y extracción del calor interior, pues los periodos de calor durante el verano no son demasiado largos. Respecto a la humedad, la envolvente debe evitar el conflicto entre la regulación de los niveles de humedad y las posibles pérdidas de calor durante los meses fríos. En muchas ocasiones, debido a la hermeticidad de la envolvente, pueden aparecer problemas de condensación. Las soluciones comunes para regular los niveles de humedad en el interior, consisten en tecnologías de tratamiento del aire y deshumidificación. Estos sistemas no contribuyen a reducir la demanda energética en los edificios, sino que la aumentan. Además de generar problemas de ruido que pueden disminuir la satisfacción de los ocupantes. Esto sugiere, que a pesar del requerimiento de mantener el calor, la ventilación a través de la envolvente, es importante para lograr la calidad del aire interior en cuanto a niveles de humedad relativa se refiere.

Además la condición de elevada humedad atmosférica que ofrece el clima templado supone una oportunidad para el diseño de envolventes que funcionen como colectores de agua. Dadas las abundantes precipitaciones distribuidas a lo largo de todo el año y la atmósfera húmeda del entorno climático templado, se valora el posible desarrollo de estrategias de recogida y almacenamiento de agua a través de la envolvente, aprovechando la gran superficie expuesta que ésta supone en el edificio. Por todo ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas templadas definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas.

A lo largo de este capítulo se han expuesto diferentes mecanismos y estrategias de adaptación que las plantas han desarrollado para hacer frente a los desafíos de la marcada estacionalidad climática y las condiciones paisajísticas de bosques densos en las regiones templadas. Siguiendo las fases propuestas en la metodología “De las plantas a la arquitectura” se han explorado y valorado diferentes adaptaciones para una posible aplicación al diseño de envolventes.

Se presenta una matriz de diseño con las funciones a desarrollar por la envolvente de climas templados, la cual propone 11 mecanismos dinámicos y 16 estrategias estáticas, haciendo un total de 27 posibles procesos biológicos como soluciones de aplicación. Para la generación del diseño conceptual se aborda el desafío de la elevada humedad atmosférica, mediante la selección de las siguientes funciones: ganar y regular humedad. Se propone, como ejemplo de envolvente en climas templados, un caso de diseño de recogida del agua exterior y de regulación de la humedad del interior. El sistema de captación y almacenamiento de la humedad exterior puede contribuir a las demandas de agua en el interior del edificio. La regulación de los niveles de humedad, para evitar problemas de condensación en el interior, se realiza mediante un sistema de ventilación pasiva que minimize las pérdidas de calor. Para ello se seleccionan diversos mecanismos dinámicos y estrategias estáticas como características dominantes que proporcionan pautas para la generación de tal diseño conceptual. Las adaptaciones seleccionadas son: apertura estomática para intercambio de humedad con el exterior; hojas con márgenes revolutos para mantener una capa de aire inmóvil en el envés; y estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración.

El caso de diseño supone el primer paso hacia la implementación técnica, y se aborda desde la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. En el "Caso de diseño 2" presentado, el mecanismo dinámico de apertura estomática se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo de regulación de los niveles de humedad interiores. Adicionalmente el otro mecanismo dinámico seleccionado (hojas con márgenes revolutos), combinado con la estrategia estática de estomas protegidos, se traduce gráficamente, y también de forma abstracta, en un sistema de captación del agua exterior.

Finalmente se aborda la posible materialización de los funcionamientos adaptativos expuestos a través de los materiales activos. Por ello, se estudian diversos materiales activos para su posible aplicación en el diseño conceptual presentado, mediante la presentación de un listado de posibles materiales activos y la realización de algunos experimentos realizados con hidrogel.

Conclusions

Most of the existing solutions to achieve envelope adaptability in temperate climates are solved by combining opposite strategies depending on the time of year. In winter, in order to cope with moderately cold temperatures and lower solar radiation, strategies for capturing solar radiation and conserving heat in the interior will be adopted. Generally, this is solved by materials that provide insulation and technologies to heat the indoor temperature, discussed in Chapter 4. During the summer, to cope with moderately warm temperatures and higher solar radiation, solar gains and extraction of the heat generated in the interior by cooling will be adopted. Although, in temperate climates, protection strategies for solar gains and removal of indoor heat are not strictly required, as summer heat periods are not too long. Regarding to humidity, the envelope must avoid the conflict between the regulation of humidity levels and the possible loss of heat during the cold months. In many cases, due to the hermeticism of the envelope, condensation problems may occur. Common solutions for regulating indoor humidity levels consist of air treatment and dehumidification technologies. These systems do not contribute to reduce energy demand in buildings, but increase it. In addition to generating noise problems that can decrease the satisfaction of the occupants. This suggests, that despite the requirement to maintain heat, ventilation through the enclosure is important to achieve indoor air quality, as far as relative humidity levels are concerned.

In addition, the high atmospheric humidity condition provides an opportunity for the design of envelopes that function as water collectors. The temperate climate is characterized by abundant rainfall distributed throughout the year and a humid atmosphere. Due to this, the possible development of strategies of collection and storage of water through the envelope is valued, taking advantage of the great exposed surface that this supposes in the building. Therefore, this research proposes the adaptability of the envelope to temperate climatic conditions defined in a passive way through new biomimetic design challenges based on the abstraction of plant adaptations.

Throughout this chapter different adaptation mechanisms and strategies that plants have developed to face the challenges of pronounced climatic seasonality and the dense forest landscape conditions in the temperate regions, have been discussed. Following the phases proposed in the methodology *"From plants to architecture"* different adaptations have been explored and assessed for a potential application to the envelope design. A design matrix with the functions to be developed by the temperate climate envelope is presented.

The matrix proposes 11 dynamic mechanisms and 16 static strategies, making a total of 27 possible biological processes as application solutions. For the generation of conceptual design, the challenge of high atmospheric humidity is addressed, by selecting the following functions: gain and regular humidity. As an example of an envelope in cold temperate, a design case is proposed, which collects the external water and regulates the indoor humidity. Capturing and storing outside humidity system may contribute to the demands of water inside the building. The regulation of humidity levels, to avoid problems of condensation in the interior, is carried out by means of a passive ventilation system that minimizes the losses of heat. For this, various dynamic mechanisms and static strategies are selected as dominant characteristics that provide guidelines for the generation of such conceptual design. The selected adaptations are: stomatal opening for moisture exchange with the exterior; leaves with curling edges to keep a layer of air immobile on the underside; and stomata to reduce water loss through transpiration.

The design case is the first step towards technical implementation, and is addressed from the graphic translation of biological principles in construction systems. In the "Design Case 2" presented, the dynamic stomatal opening mechanism is translated, graphically and abstractly, into a mechanism for regulating indoor humidity levels. In addition, the other dynamic mechanism selected (leaves with curling edges), combined with the static strategy of protected stomata, is graphically translated, and also abstractly, into an external water collection system.

Finally, the possible materialization of the adaptive behaviours exposed is discussed through the active materials. For this reason, several active materials are studied for their possible application in the conceptual design presented, by the presentation of a list of possible active materials and the carrying some experiments out with hydrogel.

Referencias

Alcaraz, F.; Clemente, M.; Barreña, J.A., Álvarez Rogel, J. (1999) *Manual de teoría y práctica de Geobotánica*. ICE Universidad de Murcia y Diego Marín. Murcia.

Al-Jayyousi, O.R., (2003) *Greywater reuse: towards sustainable water management.* Desalination, 156(1-3), pp. 181-92.

Azcón-Bieto J, Talón M (2000) *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGraw-Hill Interamericana/Edicions Universitat de Barcelona. ISBN 84-486-0258-7

Badarnah L., (2012) *Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope adaptation.* Delft University of Technology.

Bhushan B, *Biomimetics: lessons from nature–an overview*, Phil. Trans. R. Soc. A 2009 367 1445-1486; DOI: 10.1098/rsta.2009.0011, 2009

Codron, J. C. G., (2011) *Biogeografía*, Universidad de Cantabria disponible en http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia. (consultado en 2016)

Codron, J. C. G., (2011) *Biogeografía, Los factores de distribución de los seres vivos*, Universidad de Cantabria, disponible en http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia/materiales/pdfs-temas/2%2C%20Los%20factores%20de%20distribucion%20de%20los%20seres%20vivos.pdf (consultado en 2016)

DB-HS, Documento Básico HS Salubridad, Código Técnico de la Edificación, disponible en http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf (consultado en 2016)

Gibson, L. (2012). *The hierarchical structure and mechanics of plant materials*. Journal of the Royal Society Interface, 12, 106. doi: 10.1098/rsif.2012.0341

Herrmann, T., Schmida, U., (1999) *Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects.* Urban Water, 1(4), pp. 307-316.

HIDROCERAMICS, (2013-14) Rathee, A, Mitrofanova, E, Santayanon, P, *Hidrocerámica*: proyecto desarrollado en el Studio Digital Matter: Intelligent Construction, en el IAAC, Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña, 2013-2014. Disponible en https://iaac.net/research-projects/self-sufficiency/hydroceramic/ (consultado en 2015)

Koch, K., Bhushan, B., and Barthlott, W. (2009). *Multifunctional surface structures of plants. An inspiration for biomimetics.* Philosophical Transactions of the Royal Society, 367, 1487-1509. doi: 10.1098/rsta.2009.0022

López, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford, B., (2017) *How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 67, January 2017, Pages 692-703, ISSN 1364-0321, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018.

Martin ES, Donkin ME, Stevens RA., (1983) *Stomata*. London: Edward Arnold.

Menges, A., (2012). *Material Computation.* Higher Integration in Morphogenetic Design. Architectural Design, 82, London, United Kingdom: Wiley Academy.

Perés-Martínez, J., Arizaleta, M., Sanabria, M.E., Brito, L., (2004). *Características de los estomas, densidad e índice estomático y su variación en función a la injestación en Annona muricata L. y A. montana MADFAC.* Bioagro, 16(3), 213-218.

Raven P.H, Evert R.F, Eichhorn, S.E, (1992) *Biología de las plantas*, Ed: Reverté S.A.

Reichert, S., Menges, A., Correa, D. (2014). *Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness.* Computer-Aided Design, 60, 50-69. doi: 10.1016/j.cad.2014.02.010

Reyes-López, D., Quiroz-Valentín, J., Kelso-Bucio, H., Huerta-Lara, M., Avendaño-Arrazate, C., & Lobato-Ortiz, R. (2015) *Caracterización estomática de cinco especies del género Vanilla.* Agronomía Mesoamericana, 26(2), 237-246. doi:http://dx.doi.org/10.15517/am.v26i2.19279

RITE, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios disponible en http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx (consultado en 2016).

Taiz L, Zeiger E., (2007) *Fisiologia Vegetal*, Volumen 1, Universidad Jaume I, Servicio de comunicación y publicaciones.

Toral, M, Manríquez, A, Navarro-Cerrillo, R, Tersi, D, & Naulin, P. (2010) *Características de los estomas, densidad e índice estomático en secuoya (Sequoia sempervirens) y su variación en diferentes plantaciones de Chile.* Bosque (Valdivia), 31(2), 157-164. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000200009

Vogel, S., (2012) *The life of a leaf*, University of Chicago Press.

Walter, H., (1977) *Zonas de vegetación y clima*, Ed. Omega: Barcelona.

WBCS, Worldwide Bioclimatic Classification System, Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez, 1996-2017, disponible en http://www.globalbioclimatics.org/default.htm (consultado en 2017)

Willmer C, Fricker M., (1996) *Stomata*, Volume 2: Topics in plant functional biology. Springer Science & Business Media; http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0579-8.

Yu, AC, Chen, H, Chan, D, Agmon, G, Stapleton, LM, Sevit, Alex M. and Tibbitt, MW, Acosta, JD, Zhang, T, Franzia, PW, Langer, R, Appel, EA, (2016) *Scalable manufacturing of biomimetic moldable hydrogels for industrial applications*, Proceedings of the National Academy of Sciences DOI: 10.1073/pnas.1618156113

Lavandula angustifolia

CAPÍTULO 6

Climas cálidos

"La humanidad necesita una visión de futuro en expansión y sin límite. Este anhelo espiritual no puede satisfacerse por la colonización del espacio ... La verdadera frontera para la humanidad es la vida en la Tierra, su exploración y el transporte del conocimiento sobre ella a la ciencia, el arte y las cuestiones prácticas."

Edward O. Wilson, Biofilia (1984)

CHAPTER 6

Warm climates

Abstract

In the scope of this research, as an example of areas with warm climates, the European areas with Mediterranean macrobioclimate in general are taken as a case of study. In addition, a particular variant within these climates is analysed: the Mediterranean desert areas. These regions mark a transition between temperate regions to the north and tropical to the south, and also between humid and arid regions, located in Europe around the Mediterranean Sea or towards the Atlantic Ocean such as the Canary Islands or the regions of the centre-south of Portugal. The present chapter focuses on plant formations of warm climates, focusing on the Mediterranean forest and maquis shrubland, as well as the plant communities typical of the deserts. As mentioned previously in Chapter 2, this research is only concerned with adaptations of plants, because plants, unlike animals, lack displacement and must remain more exposed to changing environmental conditions.

It will be observed how the high temperatures, the water deficit and the excess of solar radiation condition the life, especially the one of the plants. Throughout this chapter different adaptation strategies successfully tested by plants in warm regions will be studied for possible applications in architectural envelopes in warm climates, following the methodology “From plants to architecture” presented in Chapter 3. Extreme solutions of mechanisms and strategies will arise as adaptations to heat, lack of water and excessive light, with great potential for technical applications in envelopes’ design process.

The chapter begins with an introduction to warm climatic characteristics by interpreting bioclimate diagrams of different cities located in those climate regions. In section 6.3 the biomes of the Mediterranean forest and maquis shrubland, and Mediterranean desert areas, and their respective plant communities, are analysed. The study is focused on the adaptations of the plants to the climatic conditions. Point 6.4 develops the exploration of biophysical information, with a description of the challenges that these plants have to face, according to the environmental parameters of temperature, humidity, light and carbon dioxide. An extensive search of biological models of adaptation to high temperatures, water deficit and excess light is carried out as limiting factors for the development in regions of warm climates. Once the biophysical information is obtained, all the examples found of interest are ordered in point 6.5, according to a classification that organizes the structural systems of plants' adaptation to the environment of warm regions by means of dynamic mechanisms or static strategies. This classification is created with the aim of facilitating the transfer of knowledge from the strategies adopted by plants to the development of new architectural solutions. Point 6.6 makes an assessment of the structural adaptation systems studied, stressing stomata as structures of special interest. They have a wide presence in the species that have evolved and adopted adaptive solutions, both dynamic mechanisms and static strategies, to warm climates. After considering the interest of the stomata in the process of biomimetic inspiration, the study of its operation and its structural systems is carried out in order to transfer them to conceptual designs for architectonic envelopes along the point 6.8. Finally, a theoretical case of envelope design is presented, through the dynamic and static adaptive behaviour (tectonic) and the definition of its adaptive design (morphological features). Section 6.10 details the conclusions of the chapter.

6.1 Introducción

En el ámbito de esta investigación, como ejemplo de zonas con climas cálidos, se toma como referencia de estudio las áreas europeas con macrobioclima Mediterráneo en general, y se analiza además una variante particular dentro de estos: las áreas mediterráneas desérticas (Figura 6.1). Estas regiones marcan la transición entre las regiones templadas al norte y las tropicales al sur, y también entre las húmedas y las áridas, localizándose en Europa alrededor del mar mediterráneo o hacia el océano Atlantico como por ejemplo las Islas Canarias o las regiones del centro-sur de Portugal.

Figura 6.1
Mapa de las regiones cálidas en Europa, macrobioclima Mediterráneo y bioclima desértico. Reelaboración a partir del Mapa Bioclimático de Europa (WBCS, 2017)

El presente capítulo, focalizado en las formaciones vegetales de los climas cálidos, se centra en el bosque y maquia mediterráneos y las comunidades vegetales propias de los desiertos. Como ya se ha justificado anteriormente, en el capítulo 2, esta investigación se interesa únicamente en las adaptaciones de las plantas, que por carecer de desplazamiento y, a diferencia de los animales, permanecer más expuestas a las cambiantes condiciones ambientales.

En el recorrido por las plantas de los climas cálidos se observará cómo las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de radiación solar condicionan la vida, especialmente la de las plantas. A lo largo de este capítulo diferentes estrategias de adaptación ensayadas con éxito por las plantas de las regiones cálidas serán estudiadas para posibles aplicaciones en envolventes arquitectónicas en climas cálidos, siguiendo la metodología "*De las plantas a la arquitectura"* presentada en el capítulo 3. De las adaptaciones al calor, a la falta de agua y al exceso de luz, surgirán soluciones extremas de mecanismos y estrategias, con un gran potencial para aplicaciones técnicas en el diseño de envolventes.

El capítulo comienza con una introducción a las características climáticas cálidas mediante la interpretación de bioclimogramas de diferentes ciudades situadas en regiones pertenecientes a dicho clima. En el punto 6.3 se analizan los biomas del bosque y maquia mediterráneos y el desierto, y sus respectivas comunidades vegetales, centrando el estudio en las adaptaciones de las plantas a las condiciones climáticas. El punto 6.4 desarrolla la exploración de la información biofísica, con una descripción de los desafíos a los que tienen que hacer frente dichas plantas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono y una extensa búsqueda de modelos biológicos de adaptación a las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz, como factores limitantes para el desarrollo en las regiones de climas cálidos. Una vez obtenida la información biofísica, en el punto 6.5 se ordenan todos los ejemplos hallados de interés, según una clasificación que organiza los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones cálidas según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde las estrategias adoptadas por las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. El punto 6.6 realiza una valoración de los sistemas estructurales de adaptación estudiados, destacando los estomas como estructuras de especial interés, con amplia presencia en las especies que evolucionaron y adoptaron soluciones adaptativas a los climas cálidos, tanto como mecanismos dinámicos como estrategias estáticas. Tras considerar el interés de los estomas en el proceso de inspiración biomimética, se profundiza en el estudio de su funcionamiento y sus sistemas estructurales a través de diversas plantas representativas de climas cálidos, para poder transferirlos a diseños conceptuales para envolventes arquitectónicas a lo largo del punto 6.8. Finalmente, en el apartado 6.9, se presenta un caso de diseño teórico de envolvente, mediante el funcionamiento adaptativo dinámico y estático (tectónica) y la definición de su diseño adaptativo (características morfológicas). En el punto 6.10 se detallan las conclusiones del capítulo.

6.2 Climas

6.2.1 Macrobioclima Mediterráneo

Tomando como referencia la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (Worldwide Bioclimatic Classification System) se considera que tienen macrobioclima mediterráneo, a cualquier altitud y valor de continentalidad, todos los territorios extratropicales de la Tierra pertenecientes a las cinturas subtropical y eutemplada, 23º a 52º Norte, en los que existen al menos dos meses consecutivos con aridez durante el período más cálido del año. La clasificación establece unos valores de temperatura media anual de 25ºC máximo, la temperatura media de las mínimas del mes más frío del año menor de 10ºC o un índice de termicidad compensado 580, T<25º, m<10º, Itc<580. El macrobioclima mediterráneo se caracteriza por una estacionalidad muy marcada, con temperaturas suaves en invierno y altas en verano, estación con un fuerte déficit hídrico. Los inviernos son tibios con temperaturas medias superiores a 10ºC durante el mes más frío y muy pocos días de helada al año, y son numerosas las perturbaciones de inestabilidad, vientos y lluvia debido a los vientos del oeste. En los veranos el aire es cálido y seco y las precipitaciones desaparecen casi totalmente. En regiones del interior la continentalización hace que la amplitud térmica aumente dando como resultado inviernos fríos y veranos muy calurosos. Respecto a la pluviosidad, las regiones mediterráneas son poco lluviosas, con precipitaciones durante un escaso número de días al año, tratándose de climas con una atmósfera seca y una insolación, sobre todo estival, muy importante.

Como visualización de estas características climáticas se adjuntan seis bioclimogramas o diagramas climáticos. Los dos primeros pertenecen a las estaciones situadas en Cabo San Vicente en Portugal (Figura 6.2) y Montepellier en Francia (Figura 6.3).

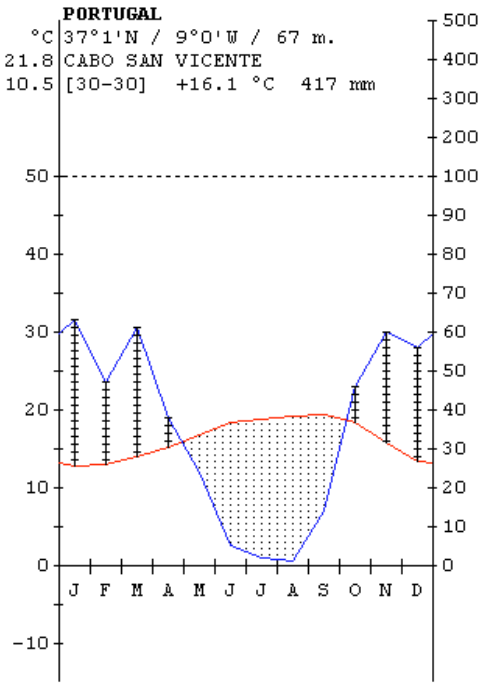


Figura 6.2
Bioclimograma de Cabo San Vicente, Portugal. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

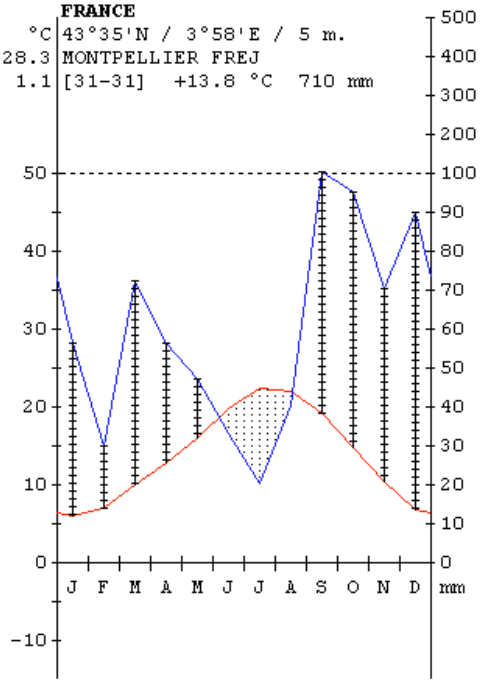


Figura 6.3
Bioclimograma de Montepellier, Francia. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

De Italia se adjuntan los correspondientes a las ciudades de Roma (Figura 6.4) y Palermo (Figura 6.5). Por último, de España se adjuntan los correspondientes a las ciudades de Madrid (Figura 6.6) y Valencia (Figura 6.7).

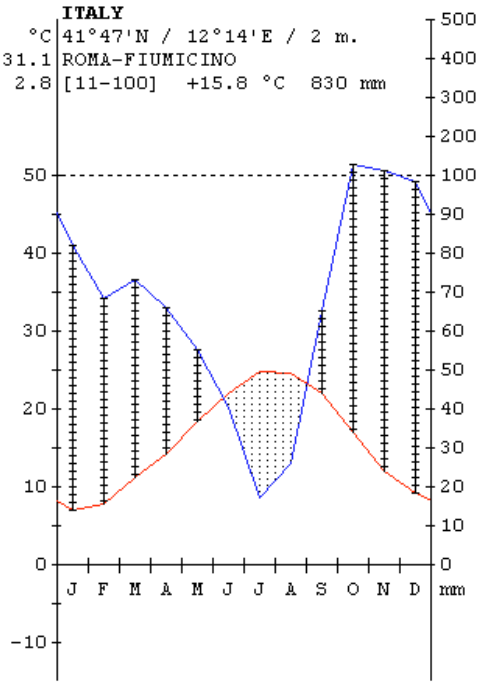


Figura 6.4
Bioclimograma de Roma, Italia. Fuente: WBCS.
Disponible en: www.globalbioclimatics.org

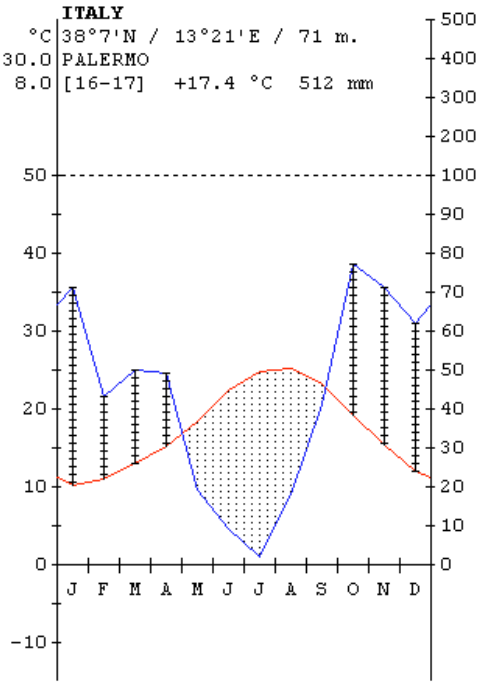


Figura 6.5
Bioclimograma de Palermo, Italia. Fuente: WBCS.
Disponible en: www.globalbioclimatics.org

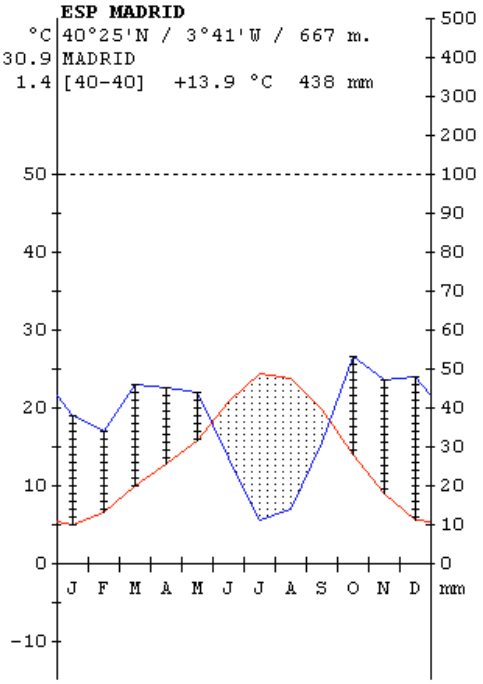


Figura 6.6
Bioclimograma de Madrid, España. Fuente: WBCS.
Disponible en: www.globalbioclimatics.org

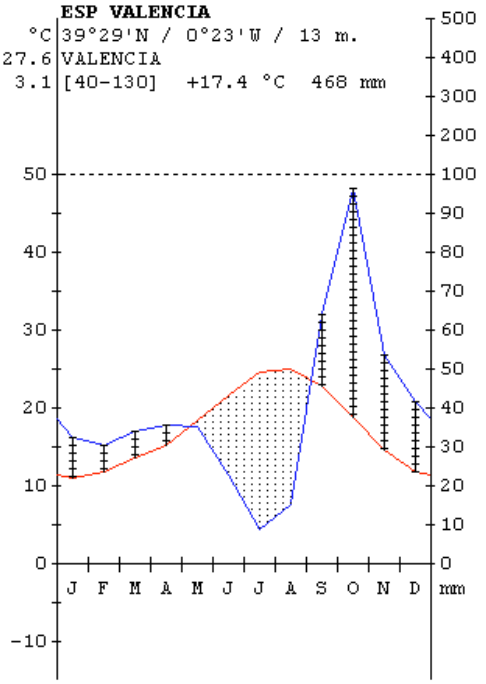


Figura 6.7
Bioclimograma de Valencia, España. Fuente: WBCS.
Disponible en: www.globalbioclimatics.org

Todas las ciudades se enmarcan en el macrobioclima mediterráneo. Los diagramas han sido extraídos de la base de datos de la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (Worldwide Bioclimatic Classification System) y registran, entre otra información, la temperatura media, curva roja, y la pluviosidad media, curva azul, mensuales a lo largo de los doce meses del año. La lectura de los diagramas refleja las temperaturas del macrobioclima mediterráneo, suaves en invierno pero altas en verano, estación en la que es característica la sequía estiva. También se aprecian las grandes amplitudes térmicas, siendo la oscilación de 27,2ºC en Montepellier, 28,3ºC en Roma y 24ºC en Palermo; ó 29,5ºC en Madrid y 24,5ºC en Valencia. Los diagramas climáticos indican las relaciones de las temperaturas y precipitaciones medias a lo largo del año en las diferentes estaciones de Portugal, Francia, Italia y España, obteniendo *"las bases más importantes para valorar el clima desde el punto de vista ecológico"* (Walter, 1977).

6.2.2 Áreas mediterráneas desérticas

La Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (Worldwide Bioclimatic Classification System) considera el clima desértico como un bioclima dentro del macrobioclima mediterráneo, que define bioclima como un espacio biofísico delimitado por unos determinados tipos de vegetación y sus correspondientes valores climáticos. El bioclima mediterráneo desértico-oceánico está representado en Europa en regiones de Murcia, Almería y las Islas Canarias, todas ellas en España. Aunque la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez incluye este bioclima dentro del macrobioclima mediterráneo, en esta tesis se estudia como un apartado independiente del anterior pues sus características darán lugar a adaptaciones extremas en las plantas y su categorización será diferente, de acuerdo a la metodología desarrollada. En adelante la nomenclatura "bioclima mediterráneo desértico-oceánico" será simplificada por "áreas mediterráneas desérticas". La principal característica de los desiertos es la aridez, por ello los desiertos son regiones donde la evapotranspiración potencial es muy superior a las precipitaciones y además, estas son extremadamente irregulares, como rasgos generales. La amplitud térmica diurna es muy grande, generalmente superior a 20ºC, debido a que la atmósfera, extremadamente seca, es incapaz de retener la irradiación terrestre y se enfría rápidamente al atardecer, con la consecuente caída de las temperaturas. Las lluvias son escasas e irregulares tanto en distribución como en volumen. Esta falta de precipitaciones sumada a la elevada evaporación, favorecida por la sequedad atmosférica y las altas temperaturas, genera una situación para las plantas de déficit hídrico permanente.

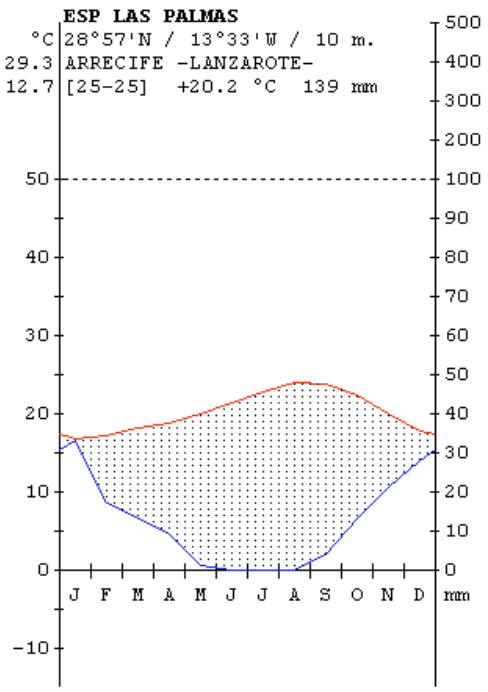


Figura 6.8
Bioclimograma de Arrecife, Lanzarote. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

Como visualización de estas características climáticas se adjuntan tres bioclimogramas o diagramas climáticos, de las estaciones situadas en Arrecife en Lanzarote (Figura 6.8), Cuevas de Almanzora en Almería (Figura 6.9) y Aguilas en Murcia (Figura 6.10), pertenecientes al bioclima desértico-oceánico. Los diagramas han sido extraídos de la base de datos de la Clasificación Bioclimática Mundial de Salvador Rivas-Martínez (Worldwide Bioclimatic Classification System) y registran, entre otra información, la temperatura media, curva roja, y la pluviosidad media, curva azul, mensuales a lo largo de los doce meses del año. La lectura de los diagramas refleja las altas temperaturas del bioclima desértico, con temperaturas medias anuales entre 20,2ºC y 19,1ºC, y el fuerte déficit hídrico permanente, con precipitaciones anuales de 139mm en Arrecife, 219mm en Cuevas de Almanzora y 177mm en Aguilas. También se aprecian las grandes amplitudes térmicas, siendo por ejemplo la oscilación de 24,6ºC en Cuevas de Almanzora, Almeria.

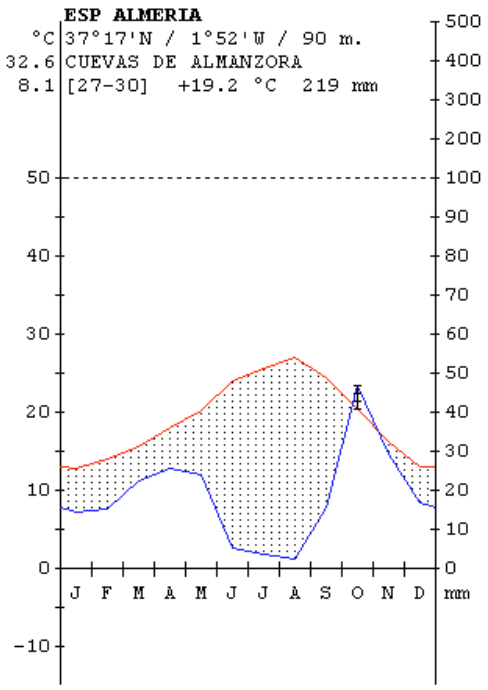


Figura 6.9
Bioclimograma de Cuevas de Almanzora, Almería. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

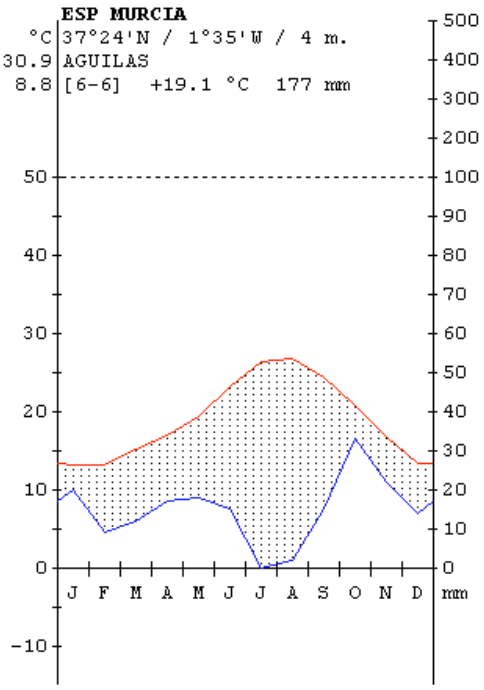


Figura 6.10
Bioclimograma de Aguilas, Murcia. Fuente: WBCS. Disponible en: www.globalbioclimatics.org

6.3 Biomas

6.3.1 Bosque y maquia mediterráneos

Características generales

Debido a la situación de transición de la región mediterránea, entre los biomas tropicales y los de latitudes altas, el mosaico de biotipos existentes es muy complejo y muchos taxones procedentes de estas áreas coinciden de una u otra forma en el mediterráneo, convirtiéndolo en una de las áreas más importantes del mundo por su biodiversidad. El bosque y la maquia mediterráneos es el bioma asociado al macrobioclima mediterráneo, de atmósfera seca e insolación, sobre todo estival, muy importante. La vegetación de este bioma tiene que hacer frente a las escasas precipitaciones, precisamente en la época del año con más luz y calor, cuando las plantas estarían en condiciones óptimas de crecimiento si tuvieran agua. Como consecuencia del calor, coincidiendo con la ausencia de precipitaciones y la actividad metabólica de las plantas, se generan elevadas tasas de evapotranspiración que provocan un intenso déficit hídrico.

En estas condiciones tan particulares las plantas han desarrollado adaptaciones peculiares la esclerófilia, gracias a su capacidad de soportar la sequía y el calor, dominan este bioma marcado por la estacionalidad donde la primavera es el periodo de máximo desarrollo debido a las suaves temperaturas, la iluminación intensa y las precipitaciones relativamente abundantes. En cambio el verano es el periodo durante el cual la vegetación detiene su actividad debido a las altas temperaturas y la falta de lluvia. El otoño, con suaves temperaturas y la reaparición de las precipitaciones, resulta favorable a la vegetación; y en invierno se registra otro periodo de reposo debido a las bajas temperaturas, aunque en las zonas costeras donde las temperaturas son más moderadas este reposo de actividad no se produce. Este factor de estacionalidad sumado a la posición de transición da lugar a diferentes paisajes cambiantes de norte a sur.

Hacia el norte las montañas introducen un factor de enfriamiento que reteniendo la humedad reducen la duración y la intensidad de la estación seca, favoreciendo la aparición de un piso caducifolio o semicaducifolio con especies como por ejemplo el rebollo (*Quercus pyrenaica*) o el quejigo (*Quercus faginea*), por encima del piso del encinar. A una altitud superior se pasa frecuentemente al bosque planocaducifolio que aprovecha las frecuentes nieblas y el óptimo pluviométrico de montaña, apareciendo hayas y robles o las coníferas propias de los climas fríos, por ejemplo los pinos en los Pirineos (*Pinus sylvestris, Pinus uncinata*) o los abetos en los Alpes Marítimos (*Abies alba, Picea abies*). Hacia el sur las montañas son mucho más secas, debido a la aridez estival, por lo que el piso planocaducifolio no aparece y del bosque esclerófilo se pasa directamente al de coníferas, con especies como el abeto (*Abies pinsapo*), los cedros (*Cedrus atlantica, Cedrus libani*) y diversas especies de pinos. Cuando la aridez es marcada, la vegetación arbórea se limita a una discontinua cubierta de enebros, sabinas, y coníferas muy resistentes tanto al frío como a la sequía. En zonas semidesérticas como valles, posiciones de abrigo o altiplanos interiores aparecen formaciones esteparias, como respuesta a las grandes amplitudes térmicas, temperaturas invernales bastante bajas y un fuerte déficit hídrico. Hacia los trópicos el clima se va haciendo más árido y los entornos mediterráneos van empobreciéndose de manera gradual hasta convertirse en estepas que, muy deprisa, dan paso al desierto (Walter, 1977) (García, 2011) (Alcaraz, 2013).

En general en este bioma, son mucho más abundantes los matorrales que las masas boscosas. El bosque mediterráneo europeo típico es el encinar, con la presencia protagonista de la encina (*Quercus ilex*), junto a otras especies como el alcornoque (*Quercus suber*), de regiones subhúmedas con inviernos suaves, o la coscoja (*Quercus coccifera*) de áreas más secas. El encinar típico está formado por un estrato arbóreo de no más de 10 metros de altura como respuesta a la falta de agua; un estrato arbustivo con especies como por ejemplo bojs (*Buxus sempervirens*), lentiscos (*Pistacia lentiscus*), algarrobos (*Ceratonia siliqua*), madroños (*Arbutus unedo*), o rosales (*Rosa sp.*); y un estrato herbáceo poco denso. En contraste con el estrato arbóreo muy poco variado, el sotobosque mediterráneo es muy rico en especies. En las zonas con suelos más pobres o los sustratos arenosos se desarrollan varios tipos de pinos muy resistentes y típicamente mediterráneos como el carrasco (*Pinus halepensis*) o el piñonero (*Pinus pinea*).

Al mismo tiempo, las regiones mediterráneas marcan el límite latitudinal natural para un buen número de taxones tropicales como las palmáceas. En cambio, en los lugares donde el suministro de agua está garantizado y desaparecen la sequía estival, como por ejemplo en las riberas fluviales, aparecen los chopos (*Populus sp.*), alisos (*Alnus sp.*), olmos (*Ulmus sp.*) o fresnos (*Fraxinus sp.*) de crecimiento muy rápido. Sólo en aquellos cursos en los que el agua desaparece por completo en verano aparecen formaciones de ribera dominadas por especies esclerófilas como la adelfa (*Nerium oleander*). La maquia, en las riberas del Mediterráneo, o también denominada chaparral en California o matorral en Chile (en estos casos con una composición florística distinta, con especies muchas veces "vicariantes"), es una formación de matorrales y arbustos dominada por especies como coscojas (*Quercus coccifera*), enebros y sabinas (*Juniperus sp.*), jaras (*Cistus sp.*), romeros (*Rosmarinus officinalis*), tomillos (*Thymus sp.*) o lavandas (*Lavandula sp.*). En muchos de estas regiones de maquia mediterránea las coníferas como los pinos o los cipreses, pueden llegar a ser muy importantes, sobre todo en las zonas montañosas, en las litorales y en las áreas con menores precipitaciones (Walter, 1977) (García, 2011) (Alcaraz, 2013).

Adaptaciones generales

La vegetación del bosque y maquia mediterráneos ha desarrollado diferentes adaptaciones para hacer frente a las escasas precipitaciones, que junto con el calor y las elevadas tasas de evapotranspiración, genera un intenso déficit hídrico. Las plantas han adoptado diversos mecanismos para limitar al máximo la transpiración manteniendo activa la fotosíntesis, como por ejemplo la reducción de tamaño tanto de la planta como de las hojas, o la sustitución de las hojas por escamas o espinas, hojas coriáceas con cutículas gruesas, recubrimiento de sustancias gomosas o resinas impermeabilizantes, aceites protectores de la radiación solar durante los meses más calurosos del año, superficies peludas blancas para aumentar el albedo y proteger los estomas mediante una capa de aire aislante, morfologías curvadas o plegadas limitando la exposición al sol y protegiendo parte de su superficie de la deshidratación, o controlar la orientación de las hojas disponiéndolas en vertical para disminuir la superficie sobre la que los rayos pueden incidir perpendicularmente. Las hojas esclerófilas, fuertemente protegidas y relativamente opacas a la luz, son representativas de este bioma por su resistencia a las largas sequías y a la alta luminosidad y temperaturas del verano.

Se caracterizan por gruesas cutículas ricas en ceras y estomas pequeños y hundidos en cavidades en el envés de la hoja, para reducir al máximo las pérdidas de agua durante la sequía. Además suelen presentar bajo la cutícula capas reforzadas que contribuyen a su dureza, siendo también frecuente la presencia de pelos o escamas que limitan la evaporación y reflejan la luz solar disminuyendo el calentamiento. Sin embargo, muchas veces todo lo descrito no es suficiente cuando el agua empieza a escasear y las plantas adoptan otras estrategias como el cierre de los estomas reduciendo así los intercambios gaseosos o el dimorfismo foliar con hojas anchas que permanecen durante la estación húmeda y otras muy pequeñas que persisten todo el año (Walter, 1977) (Valladares, 2004).

Por último, citar las adaptaciones a los frecuentes incendios forestales propiciados por las sequedad y elevadas temperaturas estivales, desarrolladas por algunas especies como el alcornoque (*Quercus suber*) cuyo tronco se recubre de una gruesa corteza aislante, el corcho; el proceso de germinación activada por fuego en la jara blanca (*Cistus albidus*) o las piñas de las coníferas que se abren en respuesta al aumento de temperatura, como mecanismo de dispersión de las semillas.

6.3.2 Formaciones vegetales desérticas

Características generales

La escasez e irregularidad de las precipitaciones impiden la existencia de una cubierta vegetal continua y las plantas crecen dispersas en el terreno para disponer de más cantidad de agua por individuo. La productividad de los desiertos es muy baja, llegando incluso las plantas a desaparecer en las áreas con condiciones más extremas. Se diferencia entre zonas hiperáridas, donde la vegetación se limita a los enclaves más favorables desapareciendo del resto del territorio, y zonas áridas donde las plantas se reparten de manera regular por la totalidad del territorio espaciándose más o menos en función del agua disponible. Se consideran zonas áridas aquellas en las que la evaporación potencial es mucho más elevada que la cantidad anual de precipitaciones (Walter, 1977). Por tanto, la gran sequedad de estas regiones provoca que sus formaciones vegetales desarrollen propiedades fisiológicas especiales para hacer frente a la sequía y les permita crecer en dichas condiciones de aridez (Walter, 1977).

Las plantas xerófilas son plantas especializadas que soportan la sequía evitando pérdidas excesivas de agua y capaces de sobrevivir en muchas ocasiones además en medios con una elevada salinidad. Las plantas suculentas son capaces de almacenar grandes reservas de agua en las hojas o el tallo. Las plantas suculentas más características son las cactáceas (en America) o algunas Euphorbiaceas en Europa y Africa, las cuales han desarrollado diversos recursos para adaptarse a la aridez, considerándose la familia vegetal más representativa de los desiertos. Los mecanismos de adaptación desarrollados tienden a repetirse por convergencia evolutiva en todas las zonas áridas del mundo, como los ejemplos de convergencias existentes en morfologías de especies de las familias citadas, pese a que las especies que los habitan no guardan necesariamente relación evolutiva directa entre sí.

Cabe mencionar la existencia de desiertos costeros, cercanos a los trópicos de las fachadas occidentales de los continentes, donde la falta de lluvias es casi continua aunque la elevada tasa de humedad y las frecuentes nieblas mitiguen un tanto la falta de agua, además de caracterizarse por unas temperaturas moderadas. En estas regiones costeras aparecen plantas capaces de vivir con el agua procedente de la condensación.

Adaptaciones generales

Debido a la aridez la vegetación de las regiones desérticas está sometida a un acusado déficit hídrico durante la mayor parte del tiempo, por lo que el medio resulta muy hostil para el desarrollo de la vida y la mayor parte de las plantas necesitan eficaces mecanismos de adaptación para poder sobrevivir en él. En general, cuanto más árida es una región, las plantas más reducen su superficie de transpiración y más separadas aparecen entre sí.

Las plantas xerófilas han desarrollado diferentes tipos de adaptaciones fisiológicas y morfológicas para hacer frente a las condiciones de aridez del medio. Mediante las adaptaciones fisiológicas se reduce la transpiración a través de la cutícula y también se limita la pérdida de agua a través de los estomas que se cierran cuando las temperaturas son muy altas aunque a su vez esto reduce en la misma proporción el intercambio de gases con la atmósfera y por lo tanto el tiempo durante el que se puede desarrollar la fotosíntesis. Las adaptaciones morfológicas son las relativas a las formas que adoptan las plantas para reducir al máximo la superficie expuesta y hacer frente a la insolación generando un ambiente más húmedo y fresco en el centro de la planta, por ejemplo las formas almohadilladas o esféricas. Las adaptaciones morfológicas en las hojas incluyen la disminución de tamaño para reducir la superficie de transpiración y facilitar la pérdida discreta de calor, superficies coriáceas o de cutícula gruesa para mantener la humedad interior, sustitución de las hojas por espinas para reducir la superficie transpirante y almacenar agua (Walter, 1977) (Azcón-Bieto & Talón, 2000) (Whitford, 2002) (Laity, 2008) (Ward, 2009).

La suculencia es otra adaptación típica de las zonas áridas, aunque no exclusiva de ellas. Durante los periodos de lluvia las plantas suculentas absorben grandes cantidades de agua, reservas que van consumiendo poco a poco y les permiten mantenerse durante largos periodos. Las plantas suculentas son capaces de almacenar importantes reservas de agua en las hojas, como por ejemplo el Agave, o en el tallo, como por ejemplo las cactáceas y algunas euphorbiaceas. En las plantas suculentas las hojas suelen ser muy pequeñas o se sustituyen por espinas realizándose la fotosíntesis en el tallo. La morfología de las cactáceas reflejan las diversas adaptaciones para hacer frente a la aridez como la sustitución de hojas por espinas para minimizar la superficie expuesta, los pelos capaces de reflejar una gran cantidad de radiación solar, superficies recubiertas por ceras que actúan como impermeabilizantes, tallos con superficies curvadas o plegadas como sistemas de sombreado, estomas protegidos dentro de concavidades superficiales o acanaladuras, o estomas que se abren por la noche y se mantienen cerrados durante el día cuando las temperaturas son muy altas evitando así las pérdidas por transpiración durante el intercambio gaseoso (Walter, 1977) (Azcón-Bieto & Talón, 2000).

Otro tipo de estrategia es la de las plantas halófilas las cuales han desarrollado mecanismos, generalmente son suculentas de pequeño tamaño y de tonos rojos o púrpura, para hacer frente a la salinidad del agua, soportando elevadas tasas de sal y aunque no son exclusivas de los desiertos se acomodan bien a ellos (Walter, 1977).

6.3.3 Adaptaciones climas cálidos

A lo largo de las descripciones previas del bosque y maquia mediterráneos y de las plantas adaptadas a los desiertos se han visto diferentes mecanismos y estrategias de adaptación que las plantas han desarrollado para hacer frente a las altas temperaturas, déficit hídrico y exceso de radiación solar. A continuación se resumen de una forma general, las adaptaciones en las hojas más representativas de los climas cálidos:

- **Adaptaciones morfológicas:** hojas coriáceas o aumento en la hoja el número de capas; control de la orientación para disminuir la superficie sobre la que los rayos pueden incidir perpendicularmente; recubrimiento de ceras, pelos o escamas reflectantes como estrategia de reflexión de la luz solar e impermeabilización foliar para reducir la transpiración; aceites esenciales como impermeabilización foliar; predominio del color blanco; en las hojas esclerófilas los estomas son más pequeños, aunque su densidad suele ser mayor, son de respuesta rápida y se ubican en el envés, incluso en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra; pelos o escamas para mantener una capa de aire inmóvil húmedo procedente de la transpiración alrededor de la hoja para evitar que el aire en contacto con la hoja no sea tan seco y mejorar la economía hídrica de la planta; hojas revolutas en las que el margen lateral de la hoja se revuelve hacia el envés para mantener una capa de aire inmóvil en el envés; reducción del tamaño de la hoja con formas aciculares, escamosas o estrechas; sustitución de las hojas por espinas para reducir la transpiración foliar; hojas suculentas para almacenar reservas de agua; y superficies foliares curvadas o plegadas como sistemas de sombreado.

- **Adaptaciones fisiológicas o funcionales:** metabolismo ácido de las crasuláceas o fotosíntesis CAM (proveniente del inglés *Crassulacean Acid Metabolism*) para aumentar la eficiencia en el uso del agua.

- **Adaptaciones al fuego:** corcho como gruesa corteza aislante; germinación activada por el fuego; mecanismos de dispersión de las semillas como la apertura de los conos con el aumento de temperatura; y tallos cubiertos con una capa de hojas muertas persistentes con función aislante del fuego, etc.

6.4 Exploración información biofísica

6.4.1 Parámetros ambientales

Previamente se ha descrito cómo las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz son los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas cálidos. A continuación de describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente dichas plantas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono (Figura 6.11):

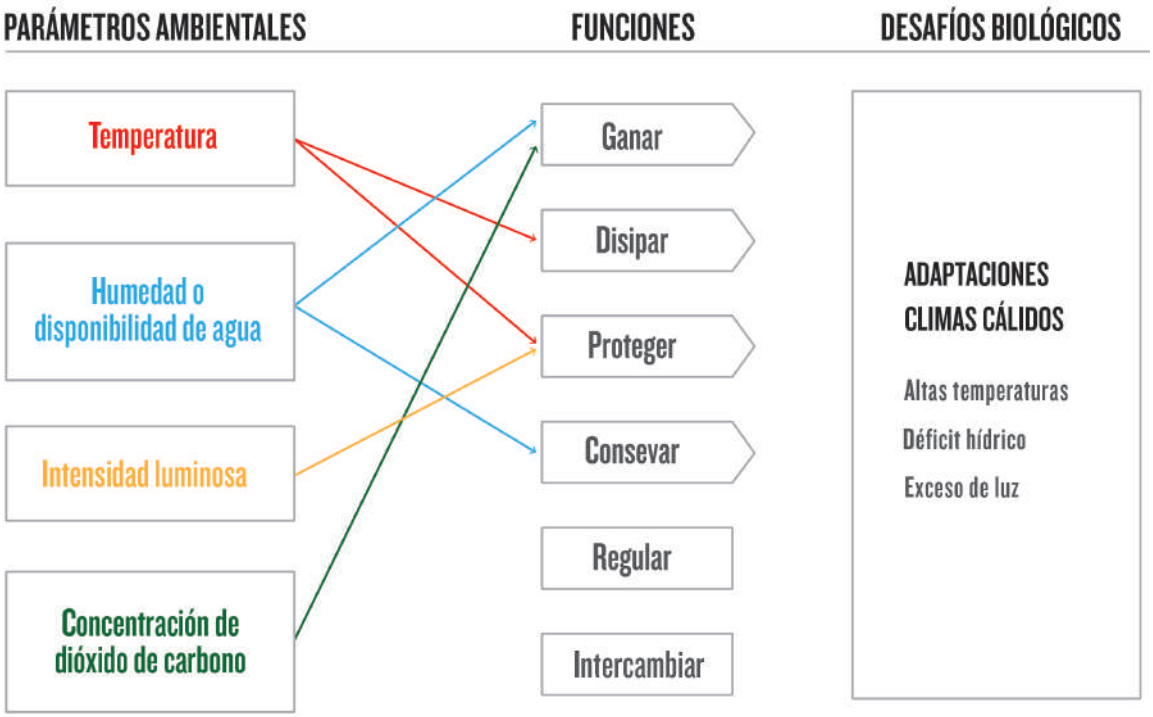


Figura 6.11
Diagrama de funciones identificadas para cada parámetro ambiental que resultarán en las diversas estrategias de adaptación de las plantas de climas cálidos.

- **Temperatura:** las hojas que crecen a plena luz del sol acumulan una gran cantidad de calor y deben disipar el exceso de energía luminosa absorbida en forma de calor para evitar daños. Aunque las plantas son capaces de adaptarse excepcionalmente a las temperaturas predominantes en el entorno, pues las plantas que crecen en zonas desérticas son capaces de incorporar dióxido de carbono a temperaturas cercanas a los 50ºC (Taiz & Zeiger, 2007), los mecanismos y estrategias de adaptación para disipar y proteger del calor son determinantes para soportar mejor las condiciones de aridez y con ello la supervivencia de las especies.

- **Humedad:** especialmente en las plantas de las regiones de climas cálidos con aridez extrema, se genera una situación de conflicto entre la necesidad de conservar el agua y la de asimilar el dióxido de carbono, por ello una de las adaptaciones para conservar agua, es el metabolismo ácido de las crasuláceas o CAM, mediante el cual los estomas se abren y fijan el dióxido de carbono por la noche (Gibson & Nobel, 1986) lo que repercute en una tasa de transpiración más baja. Este mecanismo y otras estrategias morfoanatómicas de adaptación son desarrolladas en las hojas de las plantas para ganar y conservar la máxima cantidad posible de agua disponible.

- **Luz:** en los climas cálidos, debido a la elevada radiación que resulta potencialmente dañina para las hojas, estas han desarrollado mecanismos y estrategias de adaptación para aumentar la reflexión de la luz en la superficie de la hoja y reducir así el exceso de energía luminosa. Los mecanismos y estrategias de adaptación para reflejar la absorción de luz, pudiendo llegar a soluciones de reducción de más de un 40% (Taiz & Zeiger, 2007), son fundamentales para minimizar los problemas asociados a la excesiva exposición solar.

- **Dióxido de carbono:** como se ha explicado previamente, las plantas de las regiones desérticas sufren una situación de conflicto entre la necesidad de conservar el agua y la de asimilar el dióxido de carbono, debido a lo cual desarrollan un tipo de fotosíntesis especial, el metabolismo ácido de las crasuláceas o CAM, abriéndose los estomas por la noche para captar y fijar el dióxido de carbono (Gibson & Nobel, 1986) cuando las temperaturas son mucho más bajas que durante el día que permanecen cerrados.

6.4.2 Modelos biológicos

La exploración de modelos biológicos es la búsqueda y análisis de ejemplos de adaptación de las plantas a los climas cálidos, a través de la biomecánica y morfología funcional de la superficie de sus hojas. Dicha exploración se organiza según los conceptos de desafío, función y estrategia ya explicados en el capítulo 3. Para cada parámetro ambiental se identifican diversas funciones (F), de las cuales resultarán la estrategias de adaptación de las plantas a su entorno. Es importante destacar la multifuncionalidad de las superficies de las hojas (Gibson, 2012) (Bhushan, 2009), lo que quiere decir que cada planta desarrolla varias y simultáneas estrategias de adaptación a su entorno y que a su vez una misma estrategia puede desempeñar diferentes funciones que hagan frente a diferentes desafíos a los que tiene que encararse la planta.

A continuación se desarrolla la exploración de los modelos biológicos organizada de acuerdo a tres niveles (Figura 6.12):

Nivel 1: este primer nivel define el parámetro ambiental temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

Nivel 2: este segundo nivel identifica los desafíos o retos a los que tiene que hacer frente la planta. Desafíos identificados: evitar calentamiento excesivo debido a la elevada insolación (DT1); evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación (DH1); evitar daños producidos por el exceso de radiación ultravioleta (DL1); realizar la fotosíntesis (DL2) y desarrollar la actividad fotosintética mediante el intercambio gaseoso (DG1).

Nivel 3: el tercer nivel distingue las diferentes funciones que definen directamente el desafío biológico al que hacer frente. Funciones definidas: protegerse del calor, disipar el calor, conservar el agua, protegerse de la luz, captar luz y captar dióxido de carbono.

Figura 6.12
Diagrama de la exploración de estrategias de adaptación de los modelos biológicos según parámetro ambiental, desafío y función.

Finalmente, cada una de las funciones definidas resultan en una o varias estrategias biológicas, como la forma en la que las hojas se han adaptado al medio cálido dando respuesta a los desafíos funcionales. A continuación se expone la exploración de los modelos biológicos realizada.

6.4.2.1 Temperatura

DESAFÍO DT1:	>	FUNCIÓN FT1:
Evitar calentamiento excesivo debido a la elevada insolación		Protegerse del calor

Estrategia: pubescencia foliar para disminuir el calentamiento

Modelo biológico: *Lavandula angustifolia, Euphorbia handiensis*

Figura 6.13 *Lavandula angustifolia.*
Fuente: elaboración propia.

Estrategia: enrollamiento foliar

Modelo biológico: *Ammophila arenaria, Rosmarinus officinalis*

Figura 6.14 *Ammophila arenaria.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: crecimiento en forma de cojinete esférico y espinoso, manteniendo una temperatura y un microclima interior más fresco

Modelo biológico: *Astragalus balearicus*

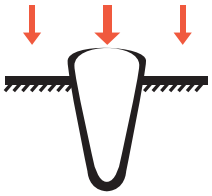
Figura 6.15 *Astragalus balearicus.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: espinas como sustitución de las hojas para minimizar la superficie expuesta

Modelo biológico: *Euphorbia canariensis, Euphorbia handiensis*

Figura 6.16 *Euphorbia canariensis.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

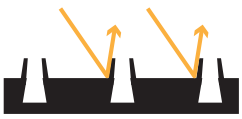
Estrategia: hojas enterradas para minimizar la superficie expuesta y aprovechar la menor temperatura del suelo circundante. Algunas *Mesembryanthemaceae* evitan la radiación excesiva, así como la desecación creciendo parcialmente enterradas en el suelo y sólo la parte superior de las hojas están expuestas (Weisser *et al.*, 1975). La luz penetra a las capas inferiores, atravesando el tejido traslúcido de forma difusa (Granados-Sánchez *et al.*, 1998).



Modelo biológico: *Lithops spp.* Cabe aclarar, que aunque estrictamente esta planta no pertenece a las regiones europeas cálidas abordadas en esta investigación, sí se incluye en la selección por proximidad (localización en zonas mediterráneas del continente africano) y su potencial para posibles aplicaciones arquitectónicas.

Figura 6.17 *Lithops spp.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra

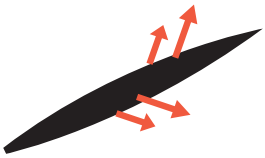


Modelo biológico: *Nerium oleander*

Figura 6.18 *Nerium oleander.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DT1:	>	FUNCIÓN FT2:
Evitar calentamiento excesivo debido a la elevada insolación		Disipar el calor

Estrategia: hojas pequeñas con formas aciculares, escamosas y estrechas que permiten enfriamiento por pérdida discreta de calor (conducción y convección hacia el aire circundante)



Modelo biológico: *Pinus halepensis, Pinus pinea, Juniperus oxycedrus, Cedrus atlantica, Cupressus sempervirens, Rosmarinus officinalis, Lavandula angustifolia, Thymelaea hirsuta*

Figura 6.19 *Lavandula angustifolia.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: morfologías globulares o columnares formando pliegues que permiten enfriamiento por pérdida discreta de calor

Modelo biológico: *Euphorbia canariensis, Euphorbia handiensis*

Figura 6.20 *Euphorbia canariensis.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: aumento densidad estomática para enfriamiento por evaporación

Modelo biológico: *Quercus suber*

Figura 6.21 *Quercus suber.*
Fuente: elaboración propia.

6.4.2.2 Humedad

DESAFÍO DH1:	>	FUNCIÓN FH1:
Evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación		Conservar el agua

Estrategia: reducción tamaño hoja incluyendo las formas aciculares, escamosas y estrechas para reducir las pérdidas de agua por transpiración

Modelo biológico: *Pinus halepensis, Pinus pinea, Juniperus oxycedrus, Cedrus atlantica, Cupressus sempervirens, Rosmarinus officinalis, Lavandula angustifolia, Thymelaea hirsuta*

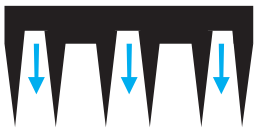
Figura 6.22 *Juniperus oxycedrus.*
Fuente: elaboración propia.

Estrategia: hojas con márgenes revolutos para mantener una capa de aire inmóvil en el envés

Modelo biológico: *Rosmarinus officinalis, Halimium umbellatum, Lavandula angustifolia*

Figura 6.23 *Halimium umbellatum.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

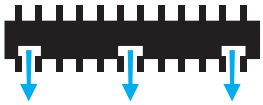
Estrategia: pubescencia foliar en el envés ó toda la hoja para reducir las pérdidas de agua por transpiración



Modelo biológico: *Salvia officinalis, Thymus vulgaris, Rosmarinus officinalis, Quercus ilex, Phlomis italica, Cistus albidus, Lavandula angustifolia, Thymelaea hirsuta*

Figura 6.24 *Salvia officinalis.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

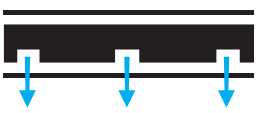
Estrategia: aceites esenciales como impermeabilización foliar



Modelo biológico: *Cistus ladanifer, Salvia officinalis, Rosmarinus officinalis, Thymus vulgaris*

Figura 6.25 *Cistus ladanifer.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas coriáceas ricas en ceras o resinas para disminuir la permeabilidad



Modelo biológico: *Quercus ilex, Quercus coccifera, Quercus suber, Ceratonia siliqua, Arbutus unedo, Cistus albidus, Myrtus communis, Thymelaea hirsuta, Crassula arborescens, Aeonium spp., Aichryson spp.*

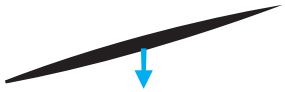
Figura 6.26 *Quercus ilex.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: estomas de tamaño reducido y protegidos, con movimientos de rápida respuesta para disminuir la permeabilidad

Modelo biológico: *Erica scoparia, Salvia officinalis, Thymus vulgaris, Rosmarinus officinalis, Halimium umbellatum , Cistus albidus, Nerium oleander*

Figura 6.27 *Erica scoparia.* Fuente: PurpleHZ. Disponible en: www.commons.wikimedia.org

Estrategia: sustitución de las hojas por espinas para reducir la transpiración foliar



Modelo biológico: *Euphorbia canariensis, Euphorbia handiensis*

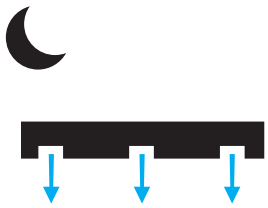
Figura 6.28 *Euphorbia canariensis.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: hojas suculentas como sistema de almacenamiento agua

Modelo biológico: *Agave americana, Crassula arborescens, Aeonium spp., Aichryson spp., Monanthes spp.*

Figura 6.29 *Agave americana.* Fuente: elaboración propia.

Estrategia: fotosíntesis CAM con apertura estomas por la noche

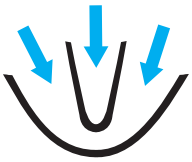


Modelo biológico: *Agave americana, Crassula arborescens, Euphorbia canariensis, Aeonium spp., Monanthes spp.*

Figura 6.30 *Monanthes spp.* Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DH1:	>	FUNCIÓN FH2:
Evitar pérdida agua y con ello los daños por deshidratación		Ganar agua

Estrategia: crecimiento de las hojas en roseta que favorece la recogida de agua



Modelo biológico: *Aeonium canariense*

Figura 6.31 *Aeonium canariense.*
Fuente: Shutterstock.
Disponible en: www.shutterstock.com/es/

6.4.2.3 Luz

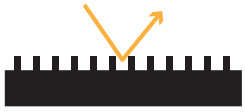
DESAFÍO DL1:	>	FUNCIÓN FL1:
Evitar daños causados por la radiación ultravioleta		Protegerse de la luz

Estrategia: pubescencia foliar para reflejar radiación ultravioleta

Modelo biológico: *Salvia officinalis, Phlomis italica, Lavandula angustifolia, Euphorbia handiensis*

Figura 6.32 *Phlomis italica. Fuente: UIB. Disponible en: www.uib.cat/depart/dba/botanica/herbari/generes/Phlomis/italica/index.htm*

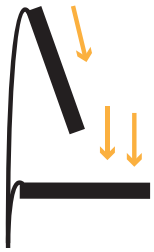
Estrategia: superficie de ceras, resinas o aceites para reflejar radiación ultravioleta



Modelo biológico: *Cistus ladanifer, Salvia officinalis, Rosmarinus officinalis, Cistus albidus*

Figura 6.33 *Cistus albidus.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

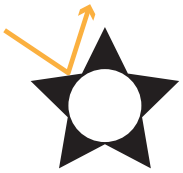
Estrategia: control de la orientación foliar para disminuir la superficie sobre la que los rayos pueden incidir perpendicularmente



Modelo biológico: *Celtis australis*

Figura 6.34 *Celtis australis.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

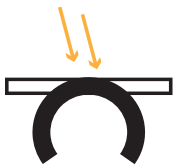
Estrategia: morfologías globulares o columnares formando pliegues como sistemas de sombreado



Modelo biológico: *Euphorbia canariensis, Euphorbia handiensis*

Figura 6.35 *Euphorbia handiensis.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

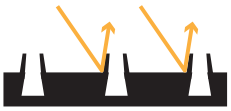
Estrategia: enrollamiento foliar reduciendo la exposición directa al sol



Modelo biológico: *Ammophila arenaria, Rosmarinus officinalis*

Figura 6.36 *Rosmarinus officinalis.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Estrategia: estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra

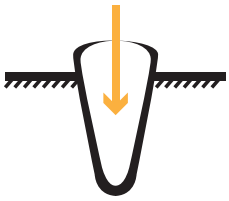


Modelo biológico: *Nerium oleander*

Figura 6.37 *Nerium oleander.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

DESAFÍO DL2:	>	**FUNCIÓN FL2:**
Realizar la fotosíntesis (plantas enterradas)		Captar luz

Estrategia: tejidos traslúcidos para filtrar la luz a la parte de la planta que permanece enterrada



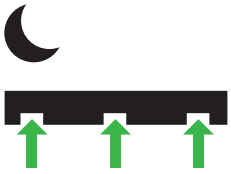
Modelo biológico: *Lithops spp.*

Figura 6.38 *Lithops spp.* Fuente: elaboración propia.

6.4.2.4 Dióxido de carbono

DESAFÍO DG1:	>	FUNCIÓN FG1:
Desarrollar la actividad fotosintética mediante el intercambio gaseoso		Captar dióxido de carbono

Estrategia: fotosíntesis CAM con apertura estomas por la noche



Modelo biológico: *Agave americana, Crassula arborescens, Euphorbia canariensis, Aeonium spp., Monanthes spp.*

Figura 6.39 *Crassula arborescens.* Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

6.5 Clasificación de datos

Una vez realizada la exploración de los modelos naturales pertenecientes a los climas cálidos, macrobioclima mediterráneo incluyendo las áreas mediterráneas desérticas, se elabora una recopilación de datos de los ejemplos biológicos explorados, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas.

A continuación se presenta la clasificación que ordena los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones cálidas según mecanismos dinámicos (MD) ó estrategias estáticas (EE), de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

6.5.1 Mecanismos dinámicos

Se consideran mecanismos dinámicos (MD) aquellas adaptaciones que responden a estímulos externos a través del movimiento, esto es, mecanismos biológicos que exhiben movimientos rápidos y reactivos en una escala de tiempo que podemos percibir, como respuesta a cambios en el medio circundante. En la Figura 6.40 se recogen los mecanismos explorados en las hojas de plantas de climas cálidos, con adaptaciones a las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz. La abstracción de los mecanismos dinámicos encontrados de interés darán lugar al funcionamiento adaptativo dinámico en la envolvente de climas cálidos, a través de su tectónica para reaccionar y mutar ante los estímulos exteriores que la solicitan.

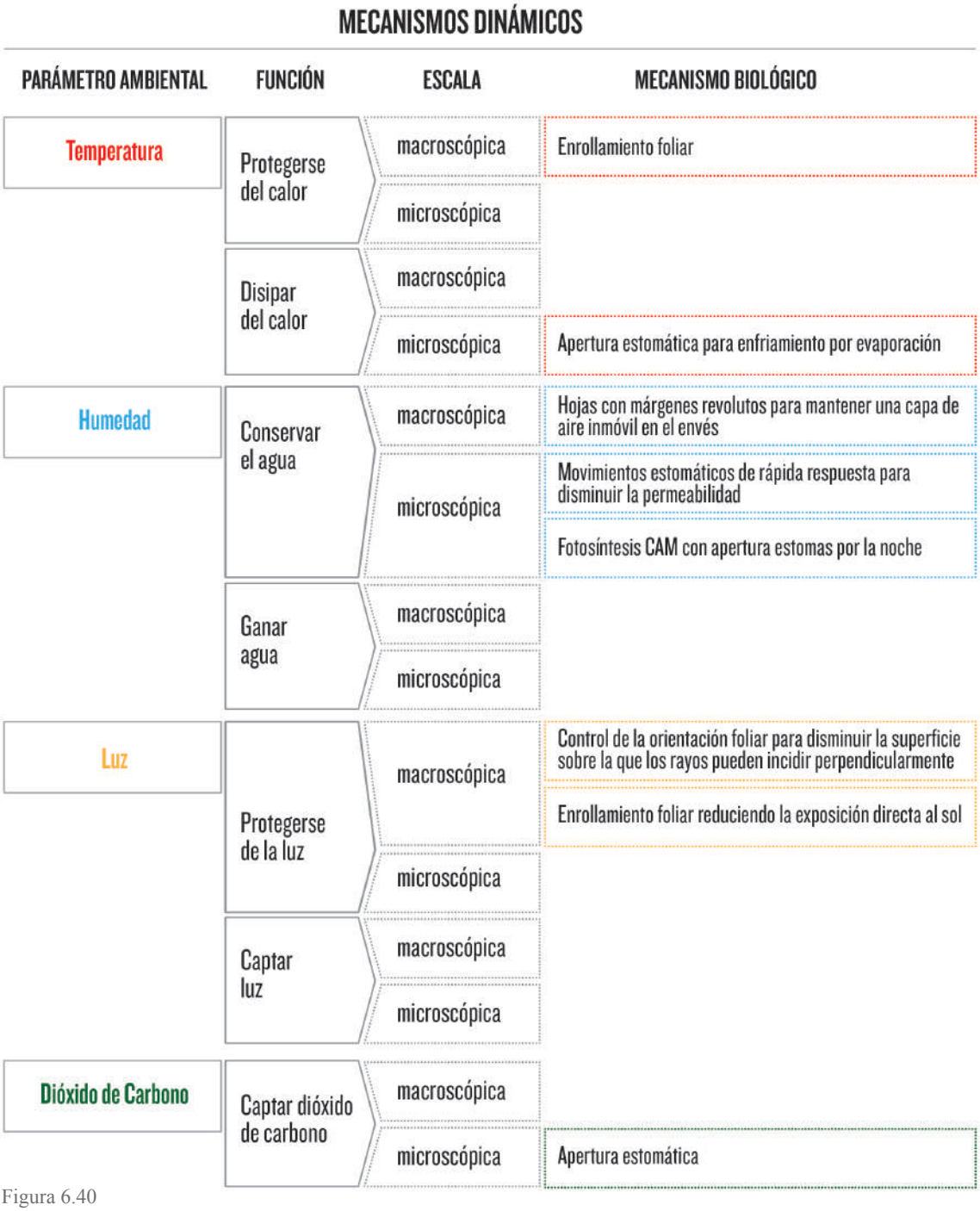


Figura 6.40
Diagrama mecanismos dinámicos en plantas de climas cálidos.

6.5.2 Estrategias estáticas

Se consideran estrategias estáticas (EE) aquellas morfologías que las superficies de las hojas han desarrollado como consecuencia directa de las adaptaciones funcionales a las condiciones ambientales (Koch *et al.,* 2009). En la Figura 6.41 se recogen las estrategias estáticas exploradas en las hojas de plantas de climas cálidos, con adaptaciones a las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz. La abstracción de las estrategias estáticas encontradas de interés darán lugar al funcionamiento adaptativo estático en la envolvente de climas cálidos y definirán su diseño adaptativo, a través de la tectónica y la generación de patrones que definan las características morfológicas.

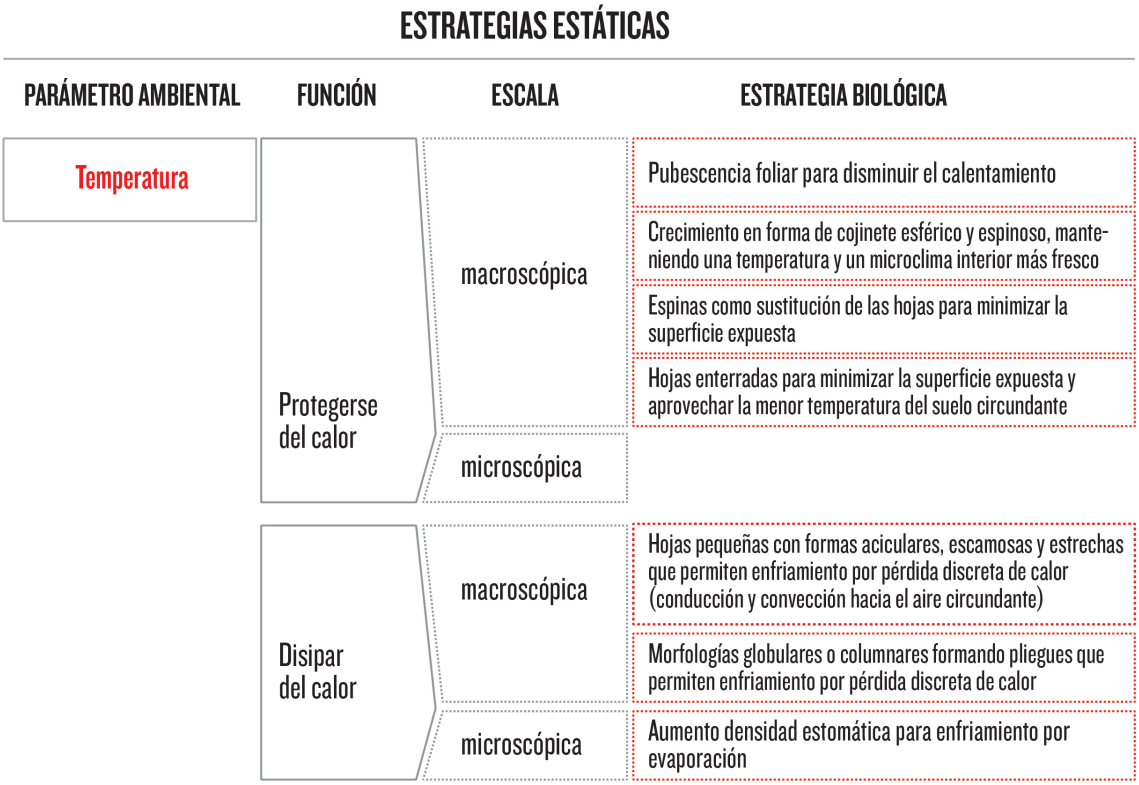


Figura 6.41-A
Diagrama estrategias estáticas (temperatura) en plantas de climas cálidos.

Figura 6.41-B
Diagrama estrategias estáticas (humedad, luz, dióxido de carbono) en plantas de climas cálidos.

6.6 Estomas

6.6.1 Valoración

Una vez categorizados diversos ejemplos de adaptación de las hojas de las plantas para una posible aplicación a envolventes arquitectónicas, se han seleccionado los estomas como estructuras de especial interés. La exploración de modelos biológicos ha resultado en una clasificación de los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, donde los estomas toman un protagonismo relevante siendo de especial interés en el proceso de inspiración biomimética. A continuación se sintetiza la presencia de los estomas en la clasificación desarrollada previamente para climas cálidos:

Estomas como mecanismos dinámicos (MD):

· Función FT2: disipar el calor
· MD: apertura estomática para enfriamiento por evaporación

· Función FH1: conservar el agua
· MD: movimientos estomáticos de rápida respuesta para disminuir la permeabilidad
· MD: fotosíntesis CAM con apertura estomas por la noche

· Función FG1: captar dióxido de carbono
· MD: apertura estomática

Estomas como estrategias estáticas (EE):

· Función FT1: protegerse del calor
· EE: pubescencia foliar protegiendo estomas

· Función FT2: disipar el calor
· EE: aumento densidad estomática para enfriamiento por evaporación

· Función FH1: conservar el agua

· EE: pubescencia foliar protegiendo estomas y reducir así las pérdidas de agua por transpiración
· EE: ceras, resinas o aceites esenciales protegiendo estomas como impermeabilización foliar
· EE: estomas de tamaño reducido y protegidos

· Función FL1: protegerse de la luz
· EE: pubescencia foliar para reflejar radiación ultravioleta
· EE: estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra

En los siguientes puntos se muestra un estudio de los estomas en los climas cálidos a través de diversas plantas representativas, con el objetivo de profundizar en el detalle de su funcionamiento y sus sistemas estructurales para poder transferirlos a la envolvente arquitectónica mediante el funcionamiento adaptativo dinámico y estático (tectónica) y la definición de su diseño adaptativo (características morfológicas).

6.6.2 Estomas como mecanismos dinámicos

A lo largo de los capítulos 4 y 5 se ha estudiado el funcionamiento de los movimientos de apertura y cierre estomáticos como mecanismos dinámicos de adaptación. En este capítulo, dedicado a los climas cálidos, se han enumerado diferentes adaptaciones de las plantas para hacer frente a las altas temperaturas, el exceso de radiación solar y el déficit hídrico, a través de modificaciones estomáticas. Bajo condiciones limitantes, las plantas disponen de mecanismos capaces de regular la apertura estomática. Por ejemplo, si el déficit hídrico pone en peligro la vida de la planta, se disparan vías de señalización que inducen el cierre de los estomas es cuestión de segundos. Como ya se ha detallado anteriormente, a medida que el dióxido de carbono entra en la hoja esta pierde vapor de agua a la atmósfera mediante la transpiración. Estos dos procesos no son separables, por lo que en el caso de los climas cálidos surge una situación de conflicto entre la apertura estomática para la captación de dióxido de carbono y el cierre estomático para evitar la pérdida de agua.

El déficit hídrico provoca cierre de los estomas, que reduce la evaporación desde el area foliar existente. El descenso de la presión de turgencia en las células oclusivas también provoca el cierre estomático como medida de cierre hidropasivo (Taiz & Zeiger, 2007). Además de la escasez de agua, las altas temperaturas registradas en los climas cálidos ejercen una gran influencia sobre la tasa de transpiración de agua, debido a que dicha tasa se duplica por cada aumento de 10ºC en la temperatura ambiente. Para mantener una temperatura en la hoja mucho más baja que la del aire es necesaria la evaporación de grandes cantidades de agua Al existir condiciones de estrés hídrico, la transpiración se ve limitada, lo que provoca un aumento de la temperatura de las hojas. Esto afecta al comportamiento de los estomas, y con temperaturas superiores a 30-35ºC se produce el cierre estomático. Por ello, muchas plantas de climas cálidos cierran sus estomas regularmente al mediodía debido al efecto de la temperatura sobre la acumulación de dióxido de carbono y debido a la deshidratación de las hojas cuando la pérdida de agua por transpiración excede la toma de agua por absorción (Raven *et al.*, 1992) (Figura 6.42).

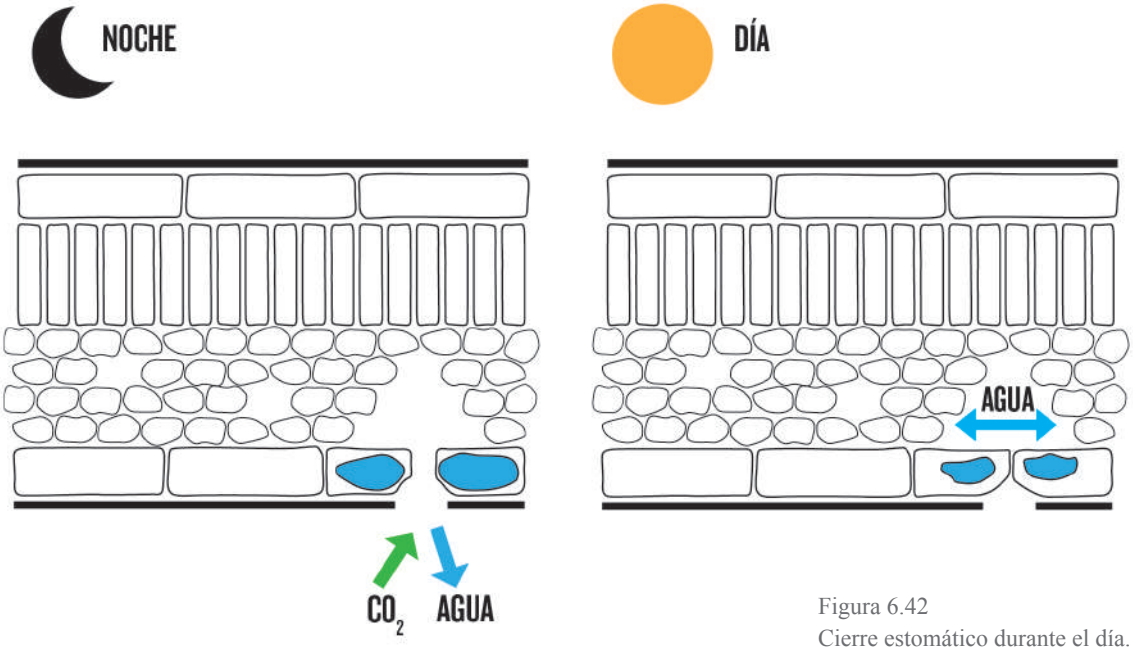


Figura 6.42
Cierre estomático durante el día.

Algunas plantas resuelven el problema de la pérdida de agua durante el proceso fotosintético abriendo sus estomas sólo durante la noche, cuando la temperatura es menor y la humedad del ambiente es comparativamente alta. El metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) es una adaptación en la que los estomas se abren de noche y se cierran durante el día. Este comportamiento, descubierto en la familia de las crasuláceas, es un tipo de adaptación fisiológica para minimizar la pérdida de agua y mejorar la ganancia de dióxido de carbono. El metabolismo CAM surge como respuesta a situaciones de estrés hídrico y estrés por calor. Muchas plantas con este tipo de adaptación pueden tolerar temperaturas de 60-65ºC en condiciones de intensa radiación solar en verano. Al mantener los estomas cerrados durante todo el día, no pueden enfriarse por transpiración y disipan el calor de la radiación solar incidente por remisión de la radiación de longitud de onda larga, perdiendo el calor por conducción y convección (Taiz & Zeiger, 2007). Respecto a la humedad, la diferencia de presión de vapor de agua entre la hoja y el aire, que dirige la transpiración, es mucho mas reducida por la noche, cuando tanto la hoja como el aire están fríos (Taiz & Zeiger, 2007). De esta forma, las plantas crasas abren sus estomas por la noche cuando las temperaturas nocturnas oscilan entre los 10ºC y los 15ºC (Granados-Sánchez *et al.*, 1998), siendo las condiciones más favorables para evitar pérdida de agua por transpiración, y toman el dióxido de carbono convirtiéndolo en ácidos orgánicos. Durante el día los estomas permanecen cerrados y el dióxido de carbono es liberado de los ácidos orgánicos para ser utilizado en la fotosíntesis (Raven *et al.*, 1992) (Figura 6.43). Este mecanismo de adaptación de las plantas CAM se encuentra entre las más eficaces del uso del agua (Taiz & Zeiger, 2007).

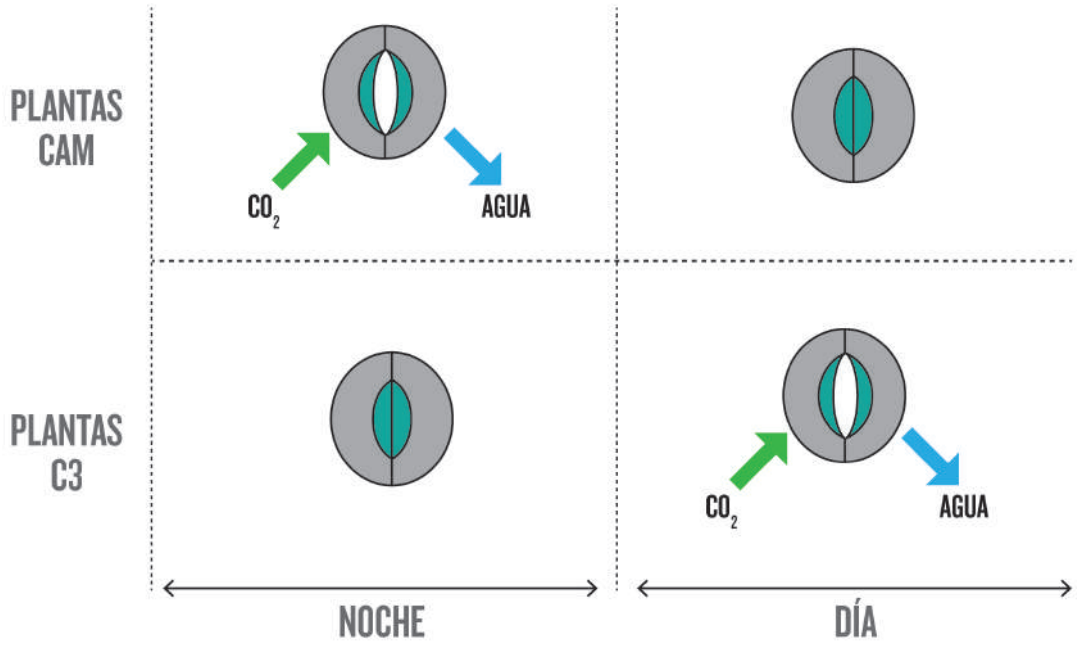


Figura 6.43
Mecanismo de apertura y cierre estomático en plantas CAM y plantas C3.

6.6.3 Estomas como estrategias estáticas

6.6.3.1 Materiales y métodos

Para el estudio presentado a continuación se examinaron las hojas de ocho especies representativas de los climas cálidos. Todas las muestras fueron tomadas en el Jardín Botánico Atlántico de Gijón, donde se retiró una selección de hojas para cada especie a estudiar, durante los meses de septiembre y octubre del año 2015. Las especies examinadas fueron: *Quercus suber*, *Quercus ilex*, *Pistacia lenticus*, *Cistus albidus*, *Lavandula angustifolia*, *Myrtus communis*, *Agave americana* y *Crassula arborescens (*Figura 6.44). Cabe aclarar, que aunque estrictamente las dos últimas plantas mencionadas no pertenecen de forma endémica a las regiones europeas cálidas abordadas en esta investigación, sí se incluyen en la selección por su disponibilidad de recogida y análisis, dado su parecido con otras especies mediterráneas y su potencial para posibles aplicaciones arquitectónicas.

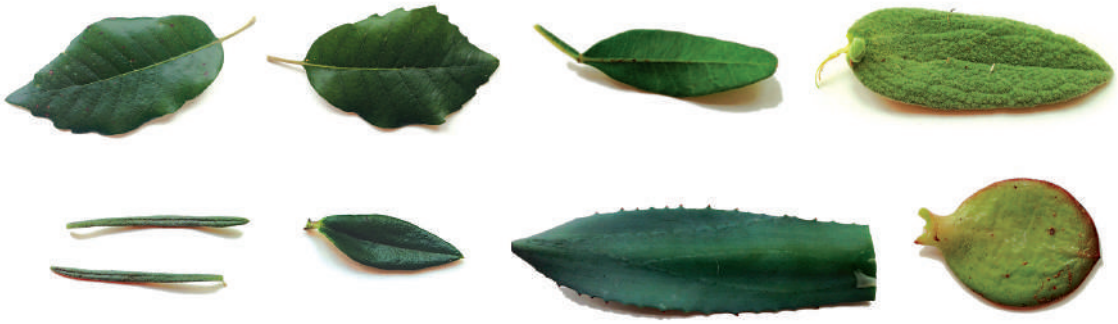


Figura 6.44
Fila superior (en orden de izquierda a derecha): *Quercus suber, Quercus ilex, Pistacia lenticus, Cistus albidus.* Fila inferior (de izquierda a derecha): *Lavandula angustifolia, Myrtus communis, Agave americana, Crassula arborescens.*
Fuente: elaboración propia.

Las tareas de observación y obtención de datos se desarrollaron en los laboratorios de la Facultad de Biología de la Universidad de Oviedo, durante los meses de octubre y noviembre del año 2015. Para la observación y conteo estomático se utilizó el protocolo general para la preparación de tejidos comúnmente usado en laboratorio (Perés-Martínez *et al.*, 2004) (Toral *et al.*, 2010) (Reyes-López *et al.*, 2015), mediante cortes en cuadrados menores a 1 cm^2 con raspado de la superficie para poder observar los estomas con claridad o incluso en algún especimen la extracción de la epidermis con pinzas. Tras estos preparativos se procedió a la colocación de la muestra sobre el portaobjetos, se añadió una gota de agua para su fijación y protegiéndolo con un cubreobjetos se observó al microscopio. Esta operación fue realizada dos veces para cada especie, para la observación de las superficies del haz y del envés de la hoja. El microscopio utilizado fue un microscopio modular manual con cámara digital integral modelo Olympus BX43 y el procesamiento de las imágenes obtenidas se llevó a cabo con el software Olympus CellSens.

6.6.3.2 Observación

El método de análisis consistió en la observación de la muestra aprovechando la gama de objetivos del microscopio: con el aumento de 10x se analizó el patrón de distribución y las estrategias anatómicas, con el aumento 20x se definió el patrón de densidad estomático y por último con el aumento 40x se midió y precisó la geometría de los estomas. A continuación se presentan los datos recogidos de cada especie observada:

MUESTRA 1

Especie: *Quercus suber*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 560mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 32 x 36 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observa una abundancia de pelos, especialmente sobre los nervios.

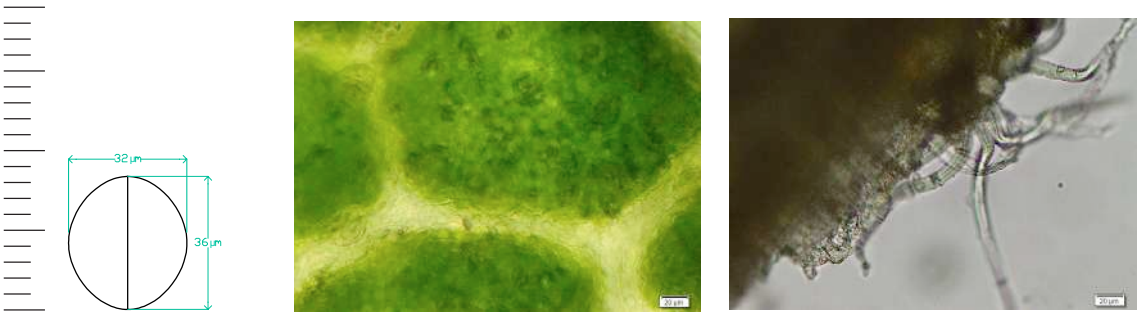


Figura 6.45
Estomas de *Quercus suber:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 2

Especie: *Quercus ilex*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación referente al patrón estomático es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 420mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 24 x 34 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observan pelos sobre los nervios.

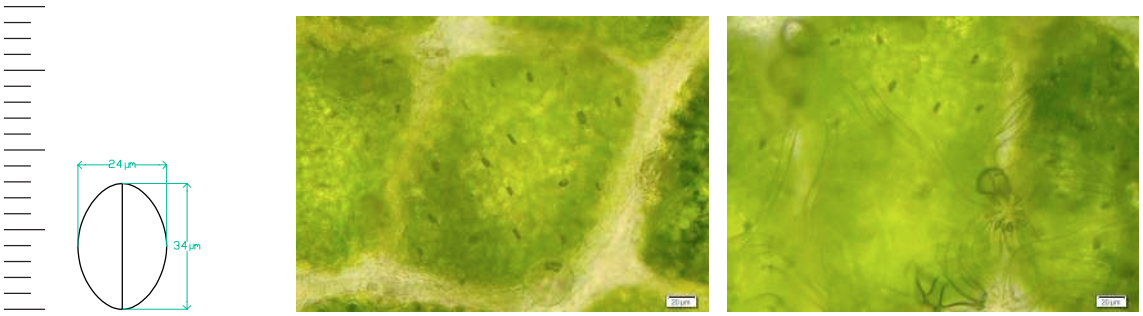


Figura 6.46
Estomas de *Quercus ilex:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 3

Especie: *Pistacia lenticus*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 160mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 29 x 48 µm

Estrategias anatómicas (3D): -

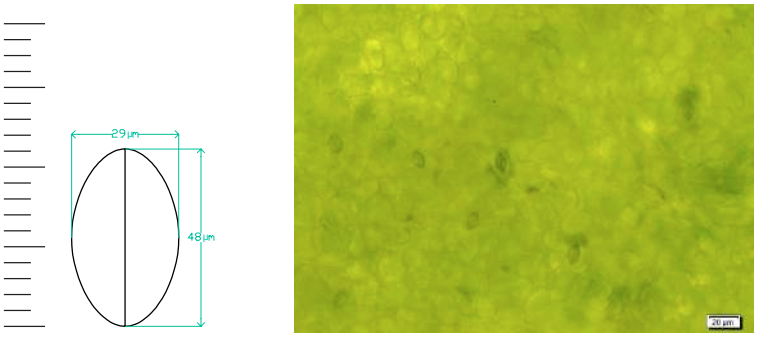


Figura 6.47
Estomas de *Pistacia lenticus:* geometría, distribución (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 4

Especie: *Cistus albidus*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación es la obtenida por observación del envés de la hoja.

>
- Densidad: 70mm^{-2}
- Distribución: aleatoria con estomas situados próximos a los nervios
- Geometría: 36 x 54 µm

Estrategias anatómicas (3D): se observa una abundancia de pelos cubriendo la totalidad de la superficie foliar, tanto por el haz como el envés.

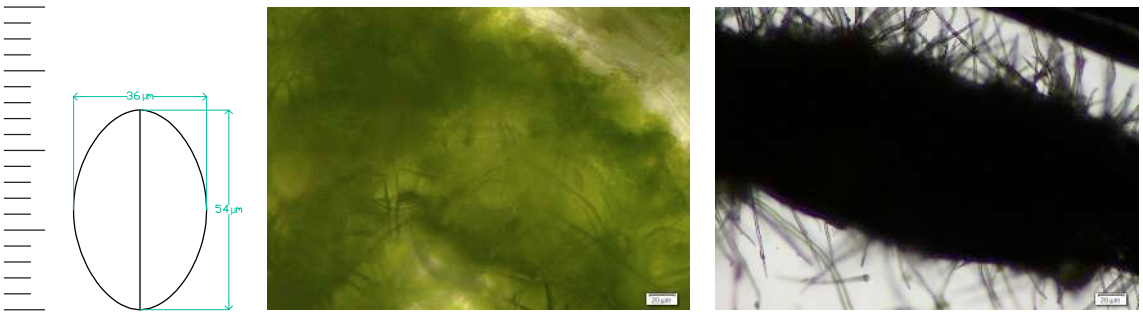


Figura 6.48
Estomas de *Cistus albidus:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 5

Especie: *Lavandula angustifolia*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación es la obtenida por observación del envés de la hoja.

>
- Densidad: 410mm^{-2}
- Distribución: regular formando patrón
- Geometría: 25 x 35 µm

Estrategias anatómicas (3D): se observa una abundancia de pelos cubriendo la totalidad de la superficie foliar, tanto por el haz como el envés.

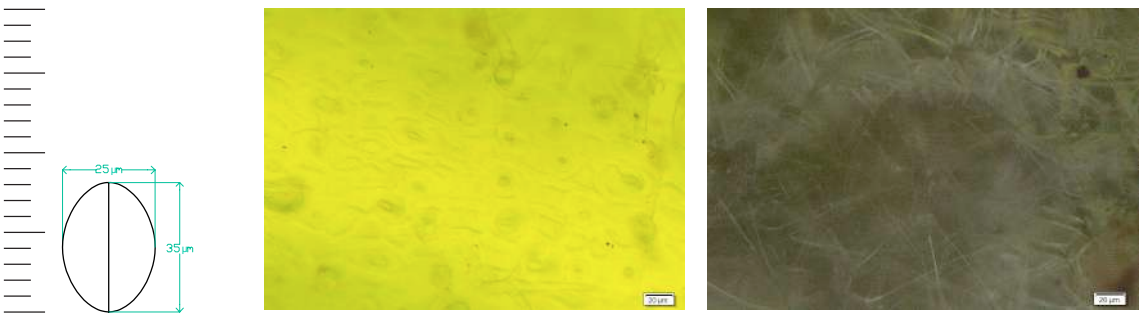


Figura 6.49
Estomas de *Lavandula angustifolia:* geometría, distribución (20x), pelos (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 6

Especie: *Myrtus communis*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 475mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 19 x 28 µm

Estrategias anatómicas (3D): en el envés se observan pelos sobre el nervio central.

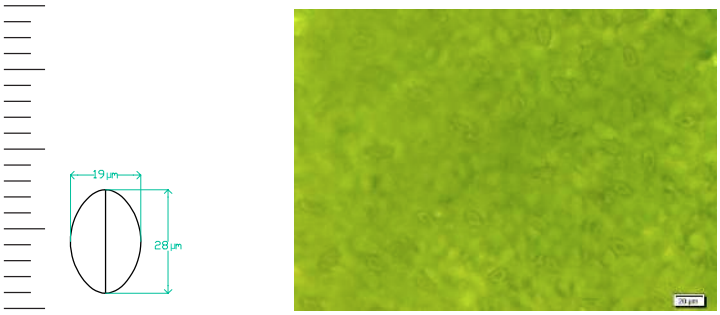


Figura 6.50
Estomas de *Myrtus communis:* geometría, distribución (20x). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 7

Especie: *Agave americana*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación es la obtenida por observación del haz y del envés de la hoja, presentando esta planta características similares entre las dos caras.

> HAZ:
> Densidad: 475mm^{-2}
> Distribución: regular formando patrón hexagonal
> Geometría: 33 x 66 µm

ENVÉS:
Densidad: 475mm^{-2}
Distribución: regular formando patrón hexagonal
Geometría: 45 x 78 µm

Estrategias anatómicas (3D): -

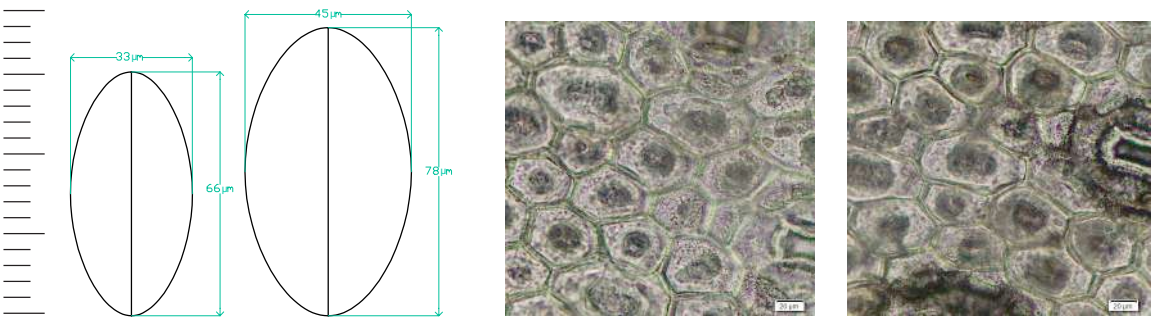


Figura 6.51
Estomas de *Agave americana:*geometría (de izquierda a derecha: haz y envés), distribución (20x) (de izquierda a derecha: haz y envés). Fuente: elaboración propia.

MUESTRA 8

Especie: *Crassula arborescens*

Patrón estomático (2D): la información detallada a continuación es la obtenida por observación del envés de la hoja.

> Densidad: 70mm^{-2}
> Distribución: aleatoria
> Geometría: 49 x 65 µm

Estrategias anatómicas (3D): superficie foliar recubierta de ceras, tanto en el haz como en el envés.

Figura 6.52

Estomas de *Crassula arborescens:* geometría, distribución (20x), detalle estoma (40x). Fuente: elaboración propia.

6.7 La envolvente en climas cálidos

6.7.1 Parámetros ambientales

Previamente se ha descrito cómo las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz son los factores limitantes para el desarrollo de las plantas en las regiones de climas cálidos. En función de ello, en el apartado 6.4.1, se detallaron los desafíos de las plantas según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. A continuación de describen brevemente los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de climas cálidos, de acuerdo a los mismos parámetros (Figura 6.53):

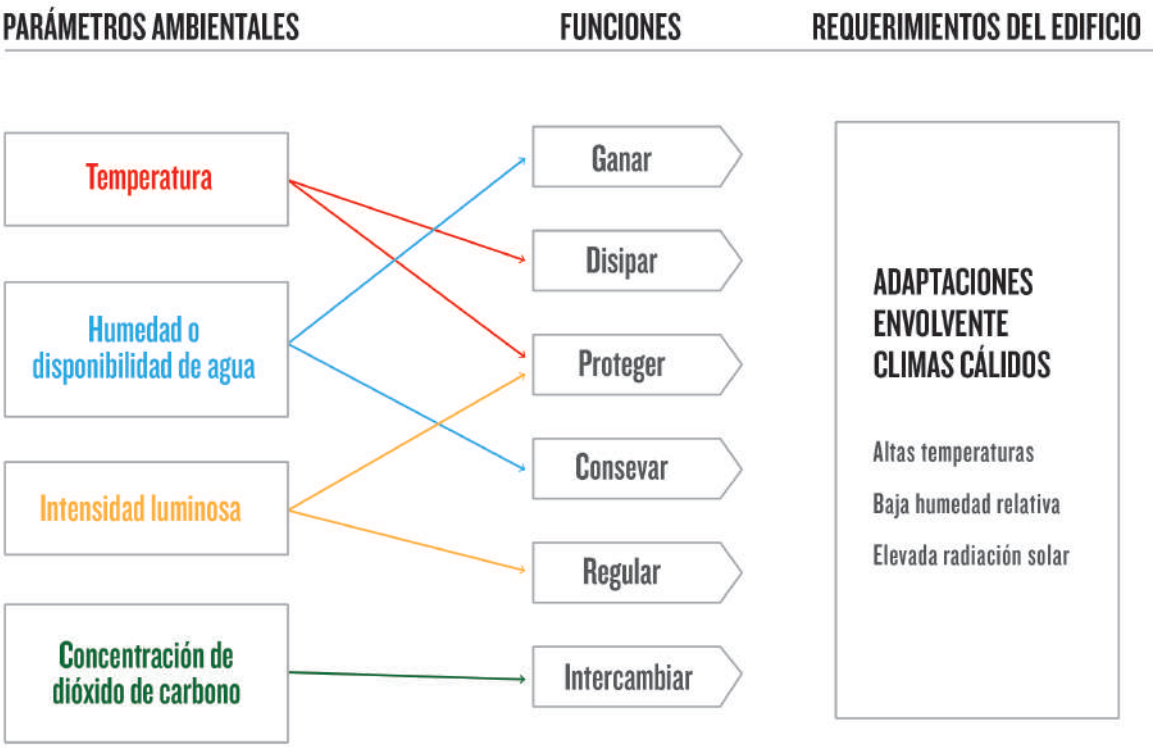


Figura 6.53
Diagrama de los desafíos de las envolventes de las regiones cálidas, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono.

· **Temperatura:** en el capítulo 2 se ha explicado la relación de la envolvente con el parámetro ambiental "temperatura" a través del confort térmico. Tomando como referencia los documentos de los reglamentos estándar como los del CTE, RITE ó los creados por la ASHRAE, la temperatura recomendada en el interior de los edificios se estima en torno a los 20-23ºC en invierno y los 22-27ºC en verano. De acuerdo a los diagramas climáticos adjuntados al comienzo del presente capítulo, se pueden comprobar las altas temperaturas registradas en las regiones de climas cálidos, alcanzando la temperatura media de las máximas del mes más cálido del año valores de 30,9 ºC en Madrid, 31,1 ºC en Roma o incluso 32,6 ºC en Cuevas de Almanzora, Almeria, por ejemplo. Por tanto, teniendo en cuenta las solicitaciones exteriores sobre el edificio, se prevén necesarias diferentes estrategias de adaptación a las altas temperaturas y al exceso de radiación solar con el objetivo de lograr y mantener los niveles de confort térmico en los espacios habitables.

· **Humedad:** de acuerdo con el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016), las condiciones interiores de humedad relativa se establecen entre los valores 45-60% en verano y 40-50% en invierno. En los climas cálidos, las regiones mediterráneas son poco lluviosas, con precipitaciones escasas que generan una atmósfera seca, y en las regiones desérticas la falta de precipitaciones acentúa esta aridez, donde la elevada evaporación, favorecida por la sequedad atmosférica y las altas temperaturas, genera una situación de déficit hídrico permanente. Dado que los niveles de baja humedad relativa pueden influir en la calidad del aire interior, provocando efectos dañinos de irritación ocular o en las vías respiratorias del ocupante (Wolkoff & Kjærgaard, 2007), la envolvente de climas cálidos debe hacer frente a este desafío mediante estrategias de adaptación para recoger la máxima cantidad posible de agua disponible.

· **Luz:** la luz solar tiene influencia directa en el comportamiento lumínico y térmico del edificio, y en consecuencia sobre las demandas para alcanzar los respectivos niveles de confort. En los climas cálidos la elevada radiación supone un desafío para la envolvente como reguladora del confort lumínico interior, el cual se deberá resolver mediante estrategias de adaptación para reflejar la absorción de luz o generar zonas sombreadas y minimizar así los problemas asociados a la excesiva exposición solar.

· **Dióxido de carbono:** en el capítulo 2 se ha explicado la relación de la envolvente con el parámetro ambiental dióxido de carbono a través de la calidad del aire interior. De acuerdo a las recomendaciones para satisfacer las condiciones de bienestar en el edificio recogidas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2016) se establecen unos valores para el dióxido de carbono de entre 500 y 800 ppm (partes por millón). Tal y como exige el Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (DB-HS, 2016) se dispondrán medios para ventilar los espacios interiores adecuadamente eliminando los contaminantes habituales producidos durante el uso normal de los edificio. En las regiones de climas cálidos, el desafío para la envolvente será proporcionar una adecuada calidad del aire interior mediante estrategias de adaptación para ventilar, evitando el conflicto entre el intercambio de aire con el exterior y las posibles ganancias térmicas.

6.7.2 Adaptabilidad

En las regiones de climas cálidos, la envolvente hará frente a las condiciones de elevadas temperaturas, intensa radiación solar y escasa humedad relativa, a través de la adaptabilidad. Dicha adaptabilidad se alcanzará mediante estrategias de protección de las ganancias solares, extracción del calor generado en el interior por enfriamiento, ventilación para mantener la calidad del aire interior, y recogida y almacenamiento de agua que puede contribuir a las demandas de agua en el interior del edificio o incluso podría ser utilizado como una fuente de enfriamiento de los espacios a través de la humidificación. En el siguiente diagrama (Figura 6.54) se sintetizan los procesos a desarrollar por la envolvente de acuerdo a las funciones definidas para hacer frente a los desafíos de las regiones de climas cálidos.

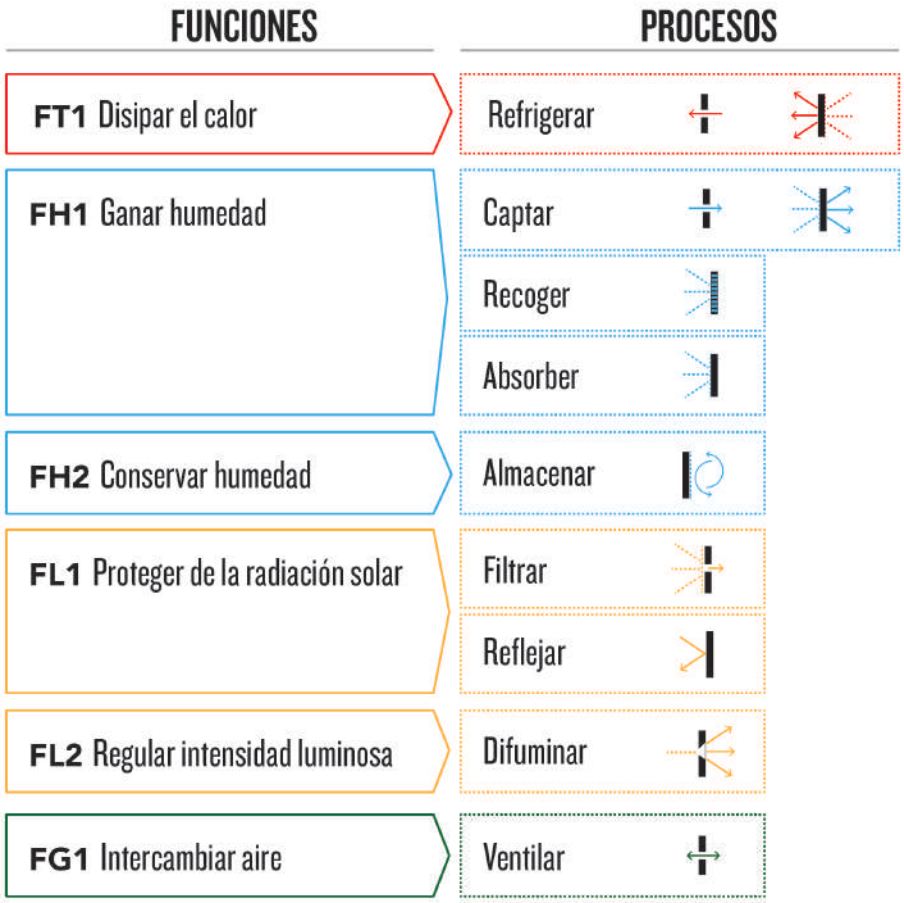


Figura 6.54
Diagrama de las funciones a desarrollar por la envolvente de acuerdo a los desafíos definidos en las regiones de climas cálidos.

6.7.3 Soluciones existentes

La mayoría de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en los climas cálidos, se resuelven mediante elementos mecánicos de protección solar, materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para enfriar la temperatura ambiente y disipar así el exceso de calor. Las soluciones comunes para hacer frente a la elevada radiación solar consisten en sistemas de sombreado para minimizar el aumento de calor, maximizar la luz del día y evitar el deslumbramiento (Bilow, 2012). Los sistemas de sombreado estándar están formados por mecanismos ajustables como persianas que controlan las variaciones de la radiación solar girando según diferentes ángulos, aunque sin una adaptación tridimensional como rastreo de la radiación solar exacta en cada momento del día (Coelho & Maes, 2009) (Badarnah, 2012) (Knaack *et al.,* 2007). Otros sistemas de control solar, de un modo activo, utilizan mecanismos móviles que dan como resultado un sombreado cinético de una gran complejidad tanto en el número de elementos empleados y su mantenimiento, como en el uso necesario de estímulos eléctricos, resultando en una adaptación alcanzada por medio de dispositivos que consumen energía eléctrica como es el caso del Instituto Árabe de París analizado en el capítulo 2. Otras soluciones optan por controlar la cantidad de luz a nivel de escala microscópica, mediante materiales termocrómicos colocados como revestimientos reflectantes (Compagno, 2002).

Respecto a las tecnologías que disipan el exceso de calor, los dispositivos más utilizados para el enfriamiento son los sistemas de aire acondicionado (Knaack *et al.,* 2007). Sin embargo, el uso de complejos mecanismos eléctricos para control solar como los sistemas de aire acondicionado no contribuyen a reducir la demanda energética en los edificios, sino que la aumentan. Además estos sistemas rara vez suelen estar integrados en la envolvente desde el proceso inicial de diseño, lo que genera la aparición poco estética de elementos agregados tanto en el exterior como en el interior de la envolvente, como el caso de las cajas o unidades de aire acondicionado (Figura 6.55). Por todo ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas cálidas definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas.

Figura 6.55
Unidad exterior e interior de sistema de aire acondicionado. Fuente: Shutterstock. Disponible en: www.shutterstock.com/es/

Haciendo un repaso de la metodología "De las plantas a la arquitectura" (Figura 6.56), se aprecia cómo a lo largo del capítulo se ha completado la Fase 1-Biología, y de la Fase 2-Transición se ha ido desarrollando la sub-fase "Abstracción" y la sub-fase "Valoración". Respecto a esta última, durante este apartado (6.7.2-La envolvente en climas cálidos), se han descrito los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de climas cálidos, de acuerdo a los diferentes parámetros ambientales y se han sintetizado los procesos a desarrollar por la envolvente. También, se ha hecho un repaso de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en dichas zonas. En el próximo apartado (6.8 Generación diseños conceptuales) se darán las pautas para transferir los principios biológicos extraídos de las plantas a los requerimientos constructivos de la envolvente. Finalmente, en el apartado 6.9 se abordará la Fase 3-Arquitectura, mediante el desarrollo de un caso de diseño teórico de envolvente para climas cálidos.

Figura 6.56
Diagrama de flujo de la metodología "De las plantas a la arquitectura"

6.8 Generación de diseños conceptuales

6.8.1 Matriz de diseño

La generación de diseños conceptuales se aborda desde las seis funciones definidas que la envolvente de climas cálidos tiene que desarrollar para hacer frente a los desafíos de altas temperaturas, déficit hídrico y exceso de luz. Las funciones (F) son: disipar calor, ganar humedad, conservar la humedad, protegerse de la radiación solar, regular la intensidad luminosa e intercambiar aire con el exterior. Para cada función se presenta uno o más procesos (P) arquitectónicos a desarrollar por la envolvente para lograr la adaptabilidad al medio cálido. Para los nueve procesos arquitectónicos expuestos se proponen diversos procesos biológicos de adaptación. La matriz de diseño resultante propone 7 mecanismos dinámicos (MD) y 19 estrategias estáticas (EE), haciendo un total de 26 posibles procesos biológicos como soluciones de aplicación. A continuación se representa dicha matriz de forma visual en la Figura 6.57.

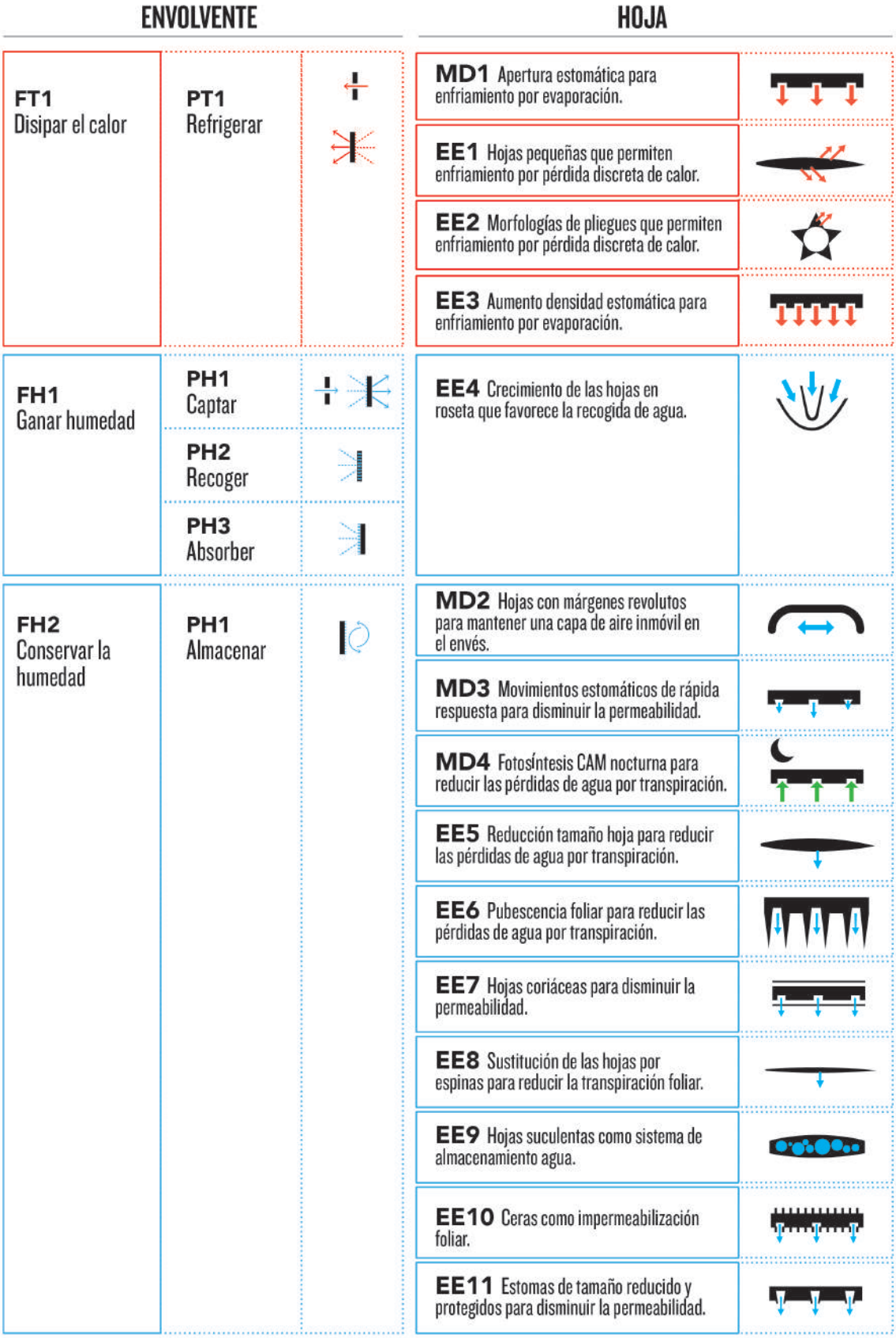


Figura 6.57-A
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas cálidos. (Temperatura y humedad)

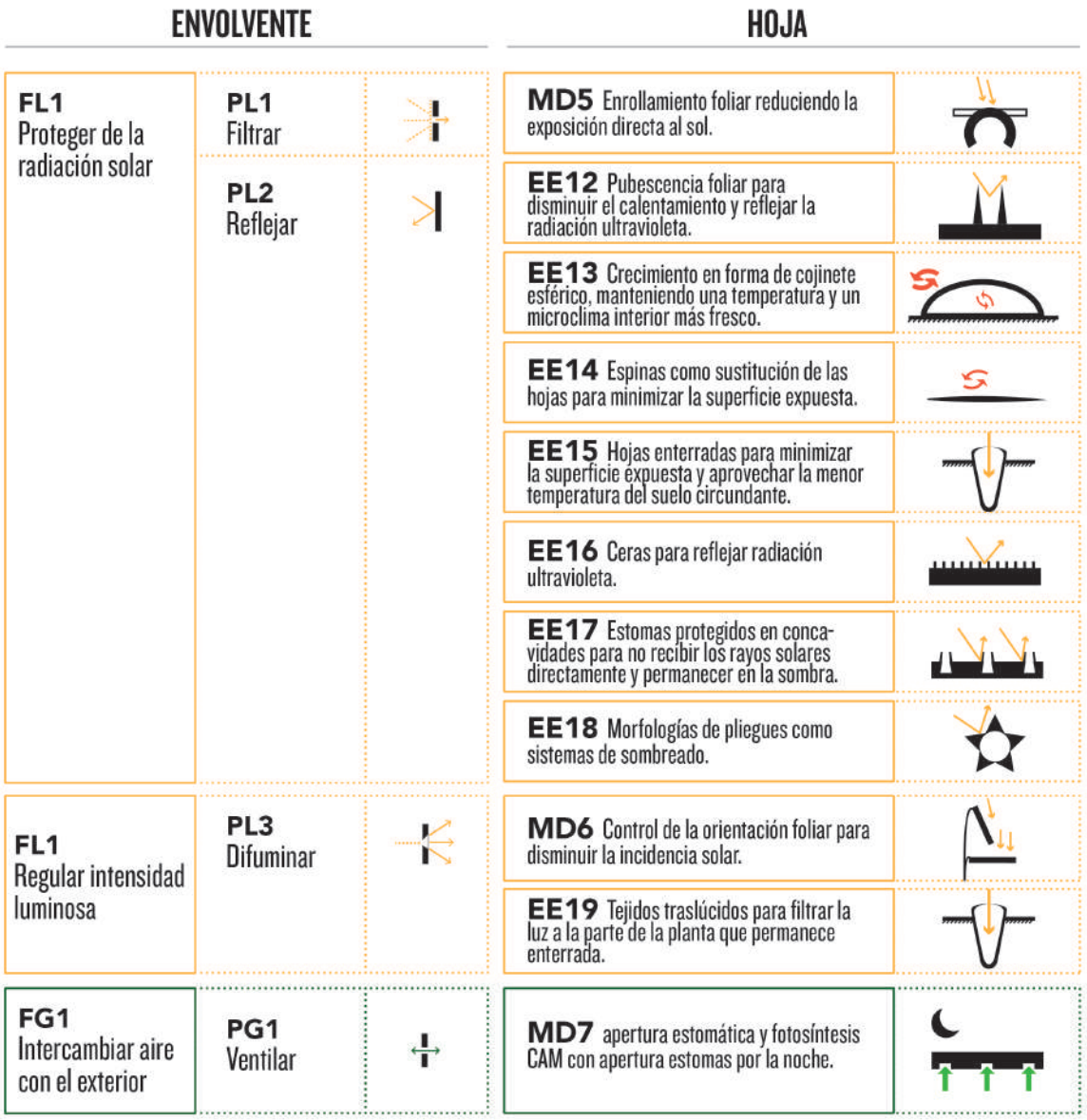


Figura 6.57-B
Matriz de diseño para la generación de diseños conceptuales de envolventes en climas cálidos. (Luz y dióxido de Carbono)

6.8.2 Valoración del diseño conceptual

Para la generación del diseño conceptual de envolvente en climas cálidos se abordan los desafíos de las altas temperaturas y el exceso de radiación solar, mediante la selección de las funciones FT1 (disipar calor), FL1 (protegerse de la radiación solar) y FG1 (intercambiar aire con el exterior) en la matriz de diseño definida previamente. La matriz indica 3 mecanismos dinámicos y 10 estrategias estáticas relevantes para la generación del diseño conceptual:

Mecanismos dinámicos:

MD1: apertura estomática para enfriamiento por evaporación

MD2: enrollamiento foliar para reducir la exposición directa al sol

MD3: fotosíntesis CAM con apertura estomática por la noche.

Estrategias estáticas:

EE1: hojas pequeñas con formas aciculares, escamosas y estrechas que permiten enfriamiento por pérdida discreta de calor

EE2: morfologías globulares o columnares formando pliegues que permiten enfriamiento por pérdida discreta de calor

EE3: aumento densidad estomática para enfriamiento por evaporación

EE4: pubescencia foliar para disminuir el calentamiento y reflejar la radiación ultravioleta

EE5: crecimiento en forma de cojinete esférico y espinoso, manteniendo una temperatura y un microclima interior más fresco

EE6: espinas como sustitución de las hojas para minimizar la superficie expuesta

EE7: hojas enterradas para minimizar la superficie expuesta y aprovechar la menor temperatura del suelo circundante

EE8: ceras, resinas o aceites para reflejar radiación ultravioleta;

EE9: estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra.

EE10: morfologías globulares o columnares formando pliegues como sistemas de sombreado.

Se propone, como ejemplo de envolvente en climas cálidos, un caso de diseño de protección de la radiación solar y refrigeración por ventilación mediante un sistema que minimize las ganancias de calor. Para ello, se seleccionan los siguientes MD y EE como características dominantes que proporcionan pautas para la generación de tal diseño conceptual:

· apertura estomática para enfriamiento por evaporación

· fotosíntesis CAM con apertura estomática por la noche

· pubescencia foliar para disminuir el calentamiento y reflejar la radiación ultravioleta

· crecimiento en forma de cojinete esférico para mantener una temperatura y un microclima interior más fresco

· ceras para reflejar radiación ultravioleta

· estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra

Tal y como se ha explicado en la Figura 6.56, una vez finalizada la Fase 2-Transición, el siguiente paso de la metodología "De las plantas a la arquitectura" es la implementación técnica, la cual se desarrolla en la Fase 3-Arquitectura. En el próximo apartado (6.9) se presenta un caso de diseño teórico, mediante la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos, con el objetivo de validar la metodología propuesta.

6.9 Caso de diseño 3

El caso de diseño supone el primer paso en la tarea de implementación técnica, y se aborda desde la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. La traducción gráfica abstracta incorpora la adaptabilidad de la envolvente por medio del funcionamiento adaptativo (FAD y FAE) y del diseño adaptativo (Figura 6.58). En los próximos apartados se desarrollará cada uno de ellos.

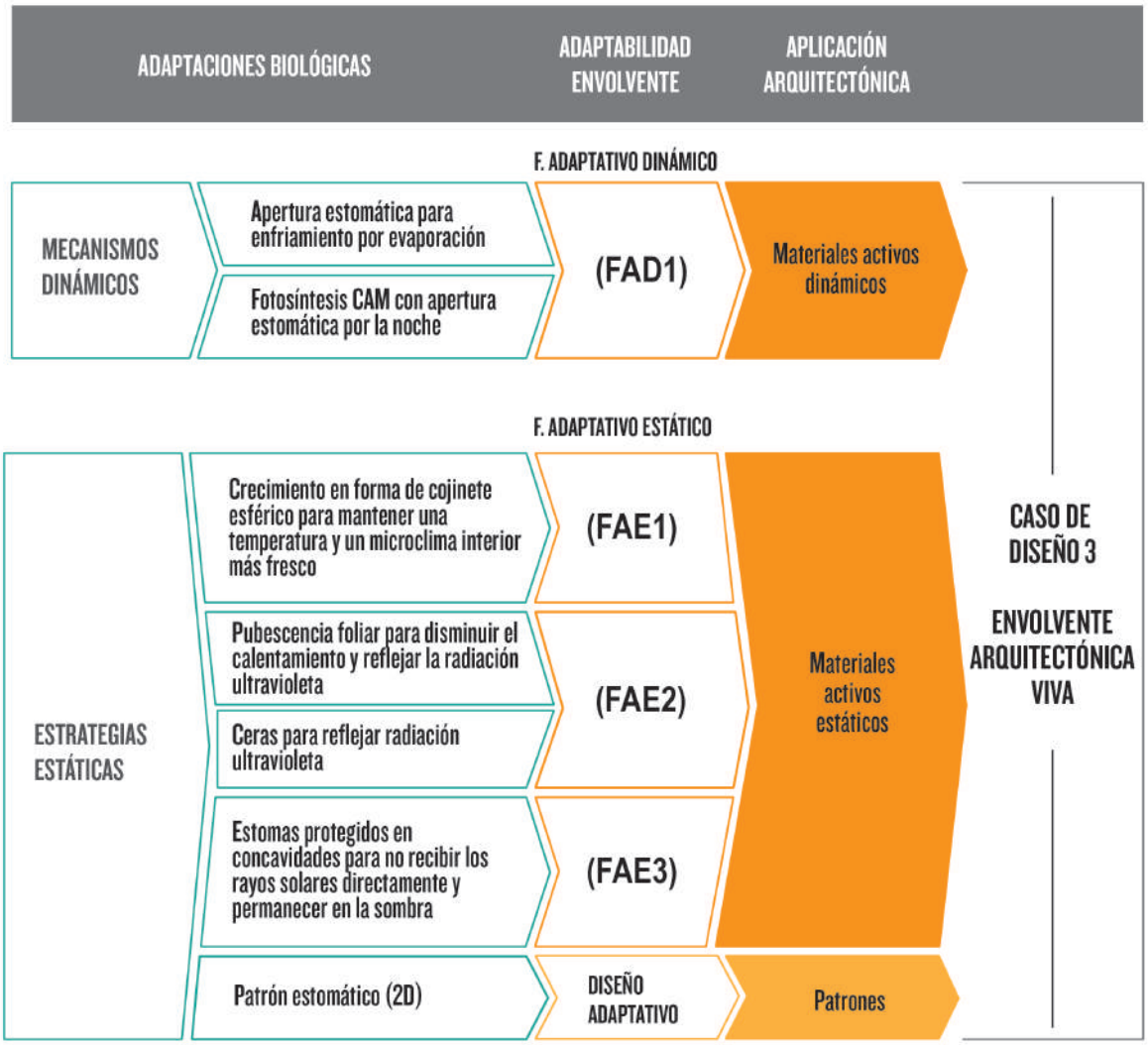


Figura 6.58
Diagrama de la adaptabilidad de la envolvente en el caso de diseño 3

6.9.1 Funcionamiento adaptativo

El funcionamiento adaptativo de la envolvente se define como su capacidad de reaccionar y mutar ante los estímulos exteriores que la solicitan. Puede desarrollarse de una forma dinámica (FAD) o estática (FAE). En el caso de diseño presentado para climas cálidos el mecanismo dinámico de apertura estomática nocturna se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo reactivo de ventilación como proceso de refrigeración. Adicionalmente las cuatro estrategias estáticas seleccionadas se traducen gráficamente, y también de forma abstracta, en estrategias reactivas de protección de la radiación solar. En la Figura 6.59 se muestra la representación gráfica abstracta del diseño conceptual.

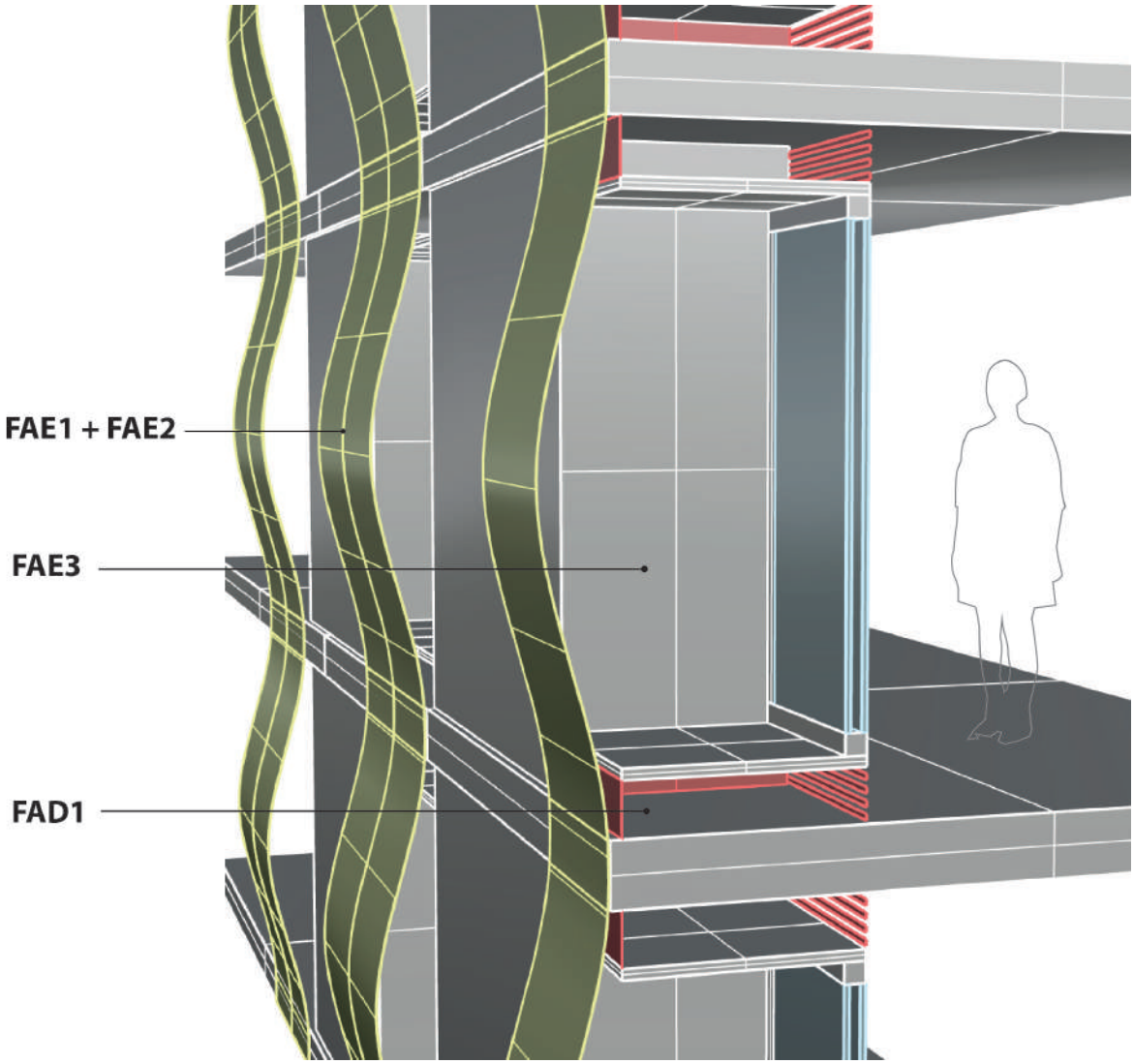


Figura 6.59
Representación gráfica abstracta del diseño conceptual de envolvente para climas cálidos.

El diseño creado se descompone en cuatro adaptaciones que trabajan de forman conjunta para hacer frente mediante la adaptabilidad a los desafíos de elevadas temperaturas e intensa radiación solar. A continuación se detalla cada una de ellas:

· **Sistema compuesto por (FAE1) + (FAE2)**

· **Funcionamiento adaptativo estático 1 (FAE1):** en este caso, la adaptabilidad propuesta consiste en la protección del exceso de calor ambiental, reduciendo las ganancias térmicas en el interior y con ello el consumo energético en sistemas de refrigeración. Para prevenir la incidencia de las altas temperaturas en el interior del edificio, se plantea la creación de una "burbuja" o espacio mediador entre la envolvente y el ambiente exterior, evitando un contacto directo entre ambos. Tomando como inspiración las formas de porte almohadillado o esférico se genera este espacio, capaz de mantener una temperatura y un microclima más fresco. En las plantas, este tipo de morfología permite reducir al máximo la superficie expuesta por unidad de volumen y hacer frente a la insolación, generando un ambiente más húmedo y fresco en el centro de la planta (García, 2011). La estrategia biológica de este tipo de crecimiento esférico se traduce gráficamente, y de forma abstracta, en la geometría de la sección de la envolvente mediante la creación de una malla con formas orgánicas abombadas (Figura 6.60).

· **Funcionamiento adaptativo estático 2 (FAE2):** este tipo de adaptabilidad se alcanza por medio de estrategias estructurales reactivas que no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento y los cambios afectan directamente a la estructura interna del material y sus propiedades específicas, como la capacidad de reflexión o disipación de la radiación solar.

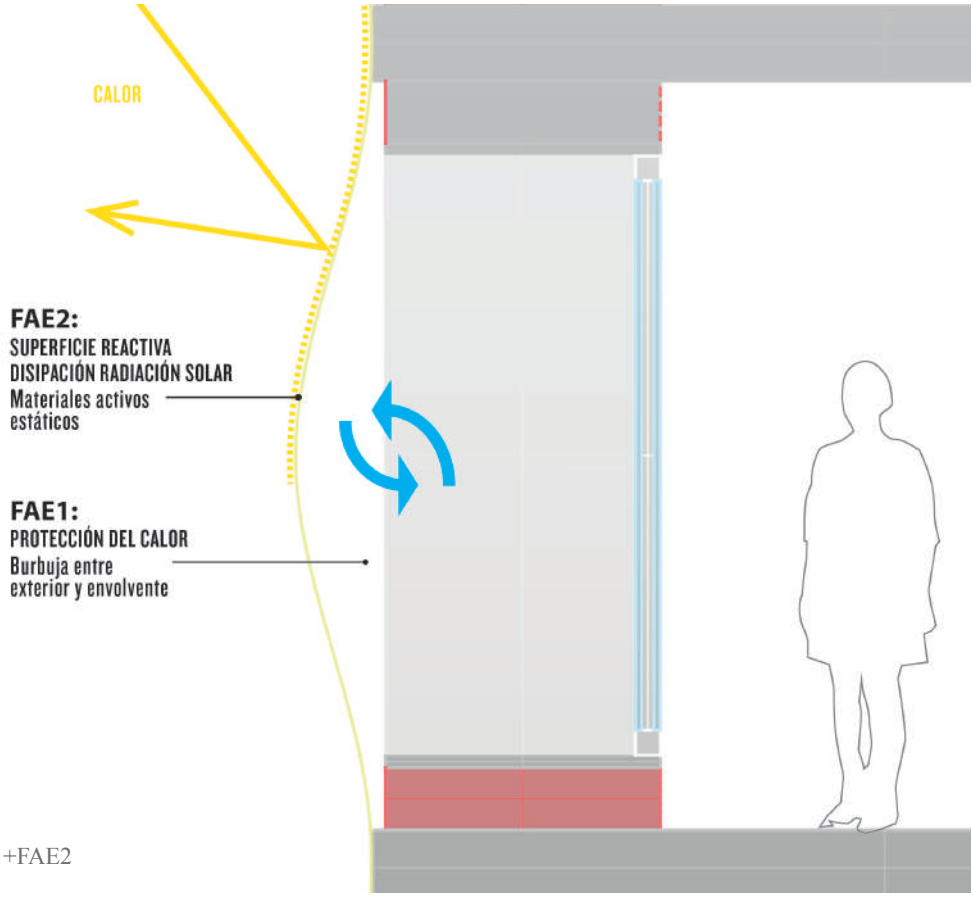


Figura 6.60 FAE1+FAE2

Para reflejar la radiación recibida, y evitar así el sobrecalentamiento de la envolvente, se plantea una solución de protección de la radiación solar tomando como inspiración los recubrimientos de pelos y ceras sobre la superficie de las hojas. Los tricomas tienen gran variedad de funciones, y estudios demuestran el desarrollo de estos atributos tridimensionales como estrategias anatómicas de adaptación, mediante el incremento de la reflectancia de la radiación solar, una menor temperatura foliar y menor tasa de perdida de agua (Willmer & Fricker, 1996) (Taiz & Zeiger, 2007). Las estrategias estáticas de pelos y ceras se traducen gráficamente, y de forma abstracta, en estrategias reactivas de protección de la radiación solar, mediante la configuración de una membrana (Figura 6.60) fabricada con materiales activos estáticos, los cuales se detallarán en el apartado 6.9.1.2.

· **Funcionamiento adaptativo estático 3 (FAE3):** en este caso, la adaptabilidad propuesta consiste en la protección del exceso de iluminación natural, para lograr un confort visual interior evitando el deslumbramiento además de reducir las ganancias térmicas provenientes de la radicación solar que penetra a través de las zonas vidriadas de la envolvente. Para controlar la radiación recibida se plantea una solución de sombreado, tomando como inspiración las morfologías de concavidades donde se protegen los estomas para no recibir los rayos solares directamente. La estrategia biológica de los estomas hundidos se traduce gráficamente, y de forma abstracta, en la geometría de la sección de la envolvente mediante el retranqueo de los elementos acristalados (Figura 6.61). Diferentes investigaciones (Hausladen *et al.*, 2006) (Bustamante, 2009) demuestran que el estudio de la localización, a través de la latitud, y de las condiciones climáticas influye en el diseño del sistemas de sombreado efectivos.

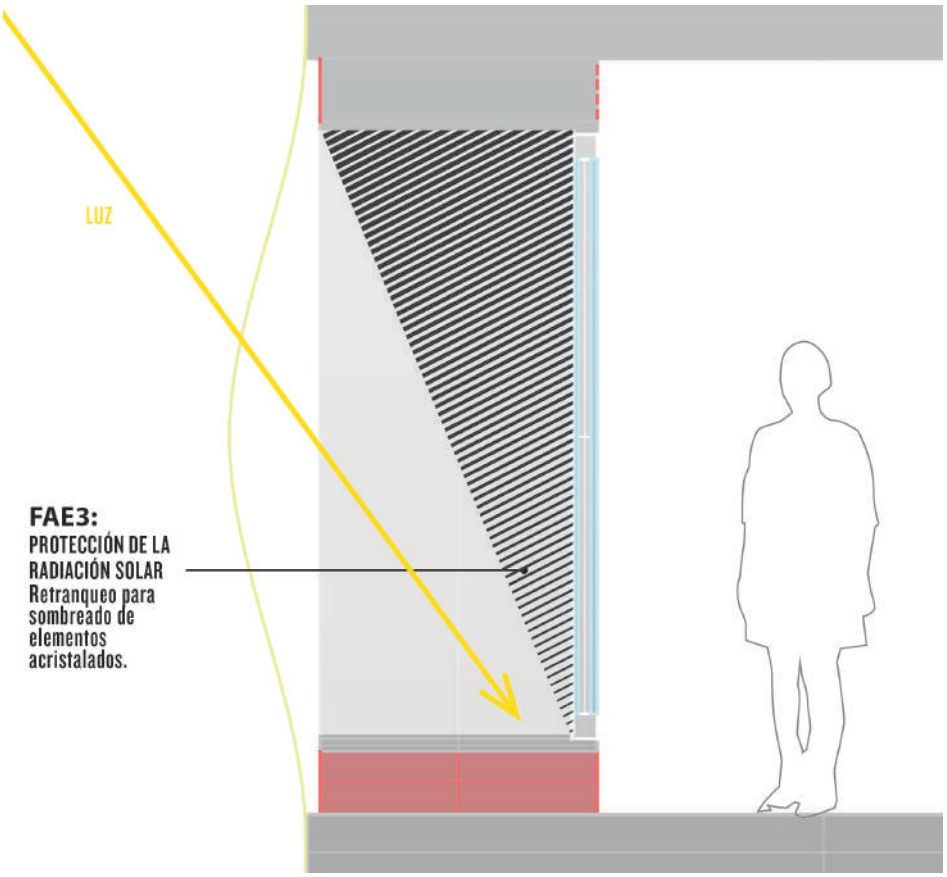


Figura 6.61 FAE3

· **Funcionamiento adaptativo dinámico 1 (FAD1):** este tipo de adaptabilidad se alcanza por medio de mecanismos estructurales reactivos, es decir aquellos en los que se observa cierto tipo de movimiento que da lugar a cambios en la configuración de la envolvente por medio de partes móviles. El mecanismo dinámico de apertura estomática nocturna que desarrollan las plantas de metabolismo CAM se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo reactivo de ventilación como proceso de refrigeración (Figura 6.62). En este caso la ventilación, además de mantener la calidad del aire interior, se ejecuta como proceso de enfriamiento para lograr el confort térmico del ambiente interior, de una forma pasiva. Para reducir la temperatura interior del edificio se propone un sistema de elementos con capacidad de doblarse, rotar o curvarse para posibilitar la entrada y salida de aire entre el exterior y el interior del edificio, abriéndose por la noche cuando la temperatura exterior ha disminuido y el aire se ha enfriado. La ventilación nocturna es un mecanismo de adaptación apto para las regiones de climas cálidos, dadas sus grandes amplitudes térmicas, como se ha visto al inicio de este capítulo. El aire frío penetra hacia el interior a lo largo de la parte inferior de la envolvente, mientras que el aire caliente almacenado a lo largo del día es extraído por la parte superior de la estancia, resultando un enfriamiento nocturno pasivo del aire desde el suelo hasta el techo. En este tipo de ventilación, por efecto de diferencia de altura, el aire con mayor temperatura provoca flujos ascendentes y facilita la ventilación que sale por aperturas a mayor altura, consiguiendo que el aire frío nocturno se introduzca en el edificio haciendo disminuir la temperatura del aire interior (Bustamante, 2009). Este tipo de ventilación es idónea para realizarse en tipologías de uso que no registran actividad nocturna y permanecen desocupados durante la noche, como las oficinas. Además el efecto de regulación térmica puede verse potenciado si los espacios interiores presentan elementos de alta inercia con capacidad de enfriarse durante la noche y de absorber el calor del aire durante el día haciendo disminuir la temperatura interior, retrasando el momento en que se alcanza la temperatura máxima interior (Bustamante, 2009).

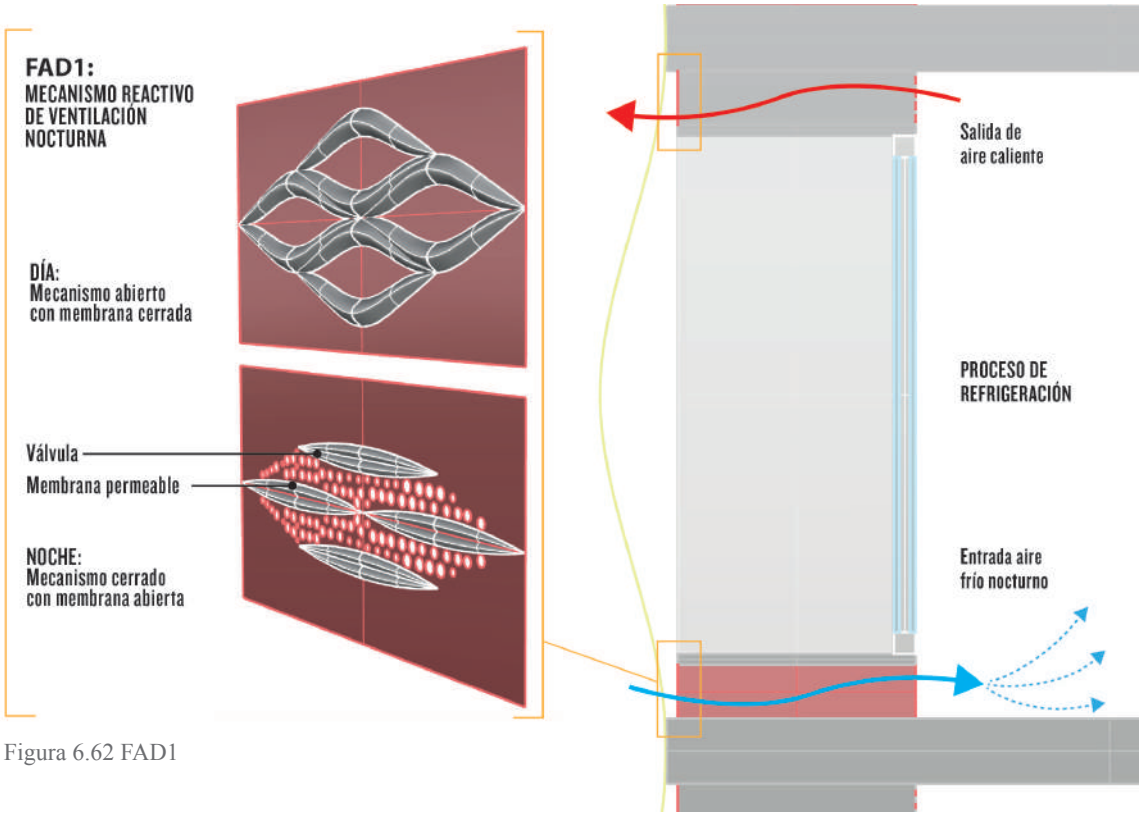


Figura 6.62 FAD1

La materialización de los funcionamientos adaptativos expuestos (FAE2 y FAD1) en implementaciones técnicas, tal y como se ha explicado en el capítulo 2, será posible a través de los materiales activos. Por ello, se estudian diversos materiales activos para su posible aplicación en el diseño conceptual presentado. A continuación se presenta un listado de posibles materiales activos y la realización de algunos experimentos:

6.9.1.1 Materiales activos dinámicos

La implementación técnica del FAD1 se desarrollará mediante el uso de materiales activos dinámicos, en los que cierto tipo de movimiento es observable a simple vista. El mecanismo de ventilación propuesto se materializará a través de configuraciones materiales que le permitan doblarse, rotar o curvarse para posibilitar la entrada y salida de aire entre el exterior y el interior del edificio. Los materiales activos dinámicos buscados son aquellos reactivos a la temperatura o a la luz, que darán lugar a cambios reversibles en la configuración de la envolvente por medio de sistemas capaces de abrirse y cerrarse, a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material, sin necesidad de estímulos eléctricos.

Materiales reactivos a la temperatura:

- **Láminas bimetálicas:** se trata de la unión de dos láminas de diferentes aleaciones metálicas con diferente coeficiente de dilatación que cuando se calientan el conjunto se deforma y la estructura que forman se dobla, proporcionando respuestas estructurales incorporadas (Howes & Laughlin, 2012) con potencial de uso en sistemas libres de estímulos eléctricos. La instalación de Bloom, estudiada en el capítulo 2, es un ejemplo del uso de estos materiales en envolventes arquitectónicas que buscan la adaptabilidad al entorno mediante procesos de ventilación automática (Kim Sung, 2013).

- **Aleaciones con efecto térmico de memoria (SMA):** las aleaciones con memoria de forma son un tipo de metales inteligentes capaces de recordar sus formas originales. Una vez deformados, al calentarlos por encima de su temperatura de transformación programada, vuelven a su forma original. Existen diferentes tipos, de acuerdo a su capacidad para recordar una o dos formas, que se accionan por medio de temperaturas diferentes (Howes & Laughlin, 2012).

- **Polímeros con memoria de forma (SMP):** polímeros inteligentes capaces de regresar de un estado deformado, forma temporal, a su forma original o permanente, inducida por un estímulo externo, en este caso un cambio de temperatura. A diferencia de los metales con memoria de forma, este tipo de polímeros se pueden fabricar fácilmente según diferentes formas (Addington & Schodek, 2004), ofreciendo así diversos usos potenciales para la ejecución de diseños no standard.

- **Polímeros termo-expansivos:** polímeros con capacidad de expansión, inducida por cambios térmicos. La combinación de dos plásticos con diferentes coeficientes de expansión térmica implican un accionamiento sensible al incremento de temperatura.Para mejorar los efectos de accionamiento del proceso pueden mezclarse con otros componentes, como el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), que es un tipo de polietileno termoplástico con

gran capacidad de expansión al ser sometido a calentamiento. En la Figura 6.63 se presentan algunas imágenes de los experimentos realizados con polímero termo-expansivo en los laboratorios UCL Healthcare Biomagnetics Laboratories, The Royal Institution of Great Britain, Londres, en el año 2015 (López *et al.*, 2015). Las imágenes muestran el uso de una cámara de infrarrojos para capturar la distribución de calor en cada posición de la expansión de la muestra. Los retos de investigación de este material pasan por reducir la temperatura de reacción, actualmente programada a partir de los 50ºC. Logrando una reducción en la temperatura de reacción se podría estudiar la posibilidad de utilización de este material en el mecanismo dinámico de ventilación propuesto como FAD1.

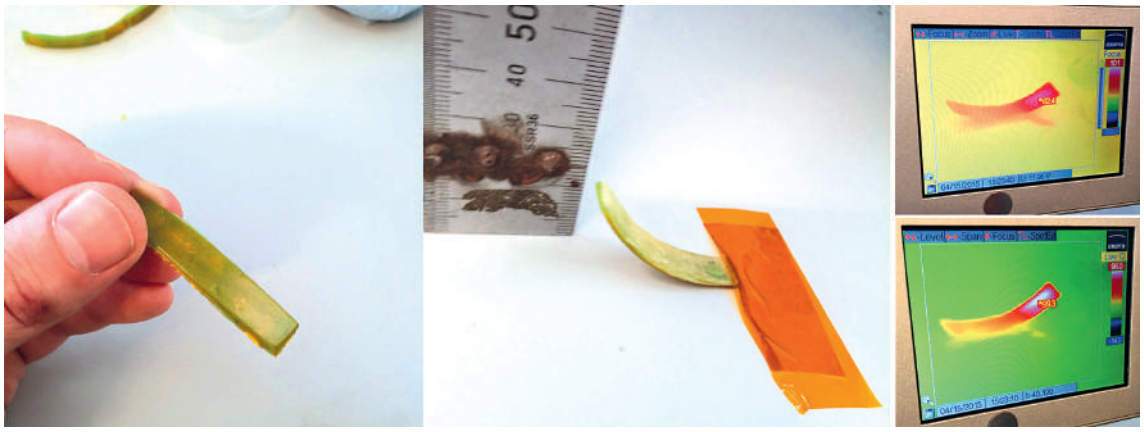


Figura 6.63
Experimentos con polímero termo-expansivo

Materiales reactivos a la luz:

- **Polímeros:** polímeros funcionales capaces de experimentar cambios de forma inducidos por la luz. Se trata de sistemas poliméricos con memoria de forma inducida por la luz, que pueden deformarse y fijarse temporalmente en una nueva forma. Investigaciones de materiales avanzados (Lendlein *et al.*, 2005) (Jiang *et al.*, 2006) estudian la conversión de los efectos foto-inducidos a nivel molecular al movimiento macroscópico, como la contracción y flexión en elastómeros o cambios de volumen en geles.

6.9.1.2 Materiales activos estáticos

La implementación técnica del FAE2 se desarrollará mediante el uso de materiales activos estáticos, en los que los cambios no suponen necesariamente ningún tipo de movimiento, afectando directamente a la estructura interna del material y sus propiedades específicas como la capacidad de reflexión o disipación de la radiación solar. Los materiales activos estáticos buscados son aquellos reactivos a la temperatura y a la luz, que darán lugar a cambios reversibles en la configuración de la envolvente por medio de color, opacidad o brillo a través de las propiedades intrínsecas en la composición del material, sin necesidad de estímulos eléctricos.

Materiales reactivos a la temperatura

· **Polímeros o tintas termocrómicas:** el termocromismo es la propiedad por la que las sustancias cambian su color debido a un cambio de temperatura. Estos materiales alteran su estructura molecular en reacción a los cambios de la energía térmica, dando lugar a diferentes valores de reflectividad que modifican la radiación reflejada en el rango visible del espectro electromagnético y cambiando su color (Addington & Schodek, 2004). Diversos estudios sobre el diseño de ventanas inteligentes (Parkin & Manning, 2006) (Saeli *et al.,* 2010) han concluido que el uso de recubrimientos termocrómicos sobre el vidrio puede influir en las propiedades de transmisión en respuesta a la temperatura y resultar en un menor consumo de energía en los edificios. Por ello, para la ejecución del FAE2 se considera la posibilidad del uso de materiales termocrómicos, como dispositivos que detectan cambios en la temperatura del entorno y responden activamente mediante un cambio de color que implicaría la reflexión de la luz y por tanto la protección al deslumbramiento y las ganancias térmicas producidas por la radicación solar. En la Figura 6.64 se presentan algunas imágenes de los experimentos realizados con polímeros termocrómicos en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la Universidad de Oviedo, en el año 2015 (López *et al.*, 2015). Los experimentos se llevaron a cabo mediante tecnología de impresión 3D (Strauss, 2013), con filamento de polímero termocrómico, compuesto por PLA y aditivos que le confieren la propiedad termocrómica. El material está configurado para cambiar su color, de verde a amarillo, cuando la temperatura sobrepasa los 37ºC. El proceso es reversible y el material recupera su color verde con la pérdida de calor, cuando la temperatura desciende de los 37ºC.

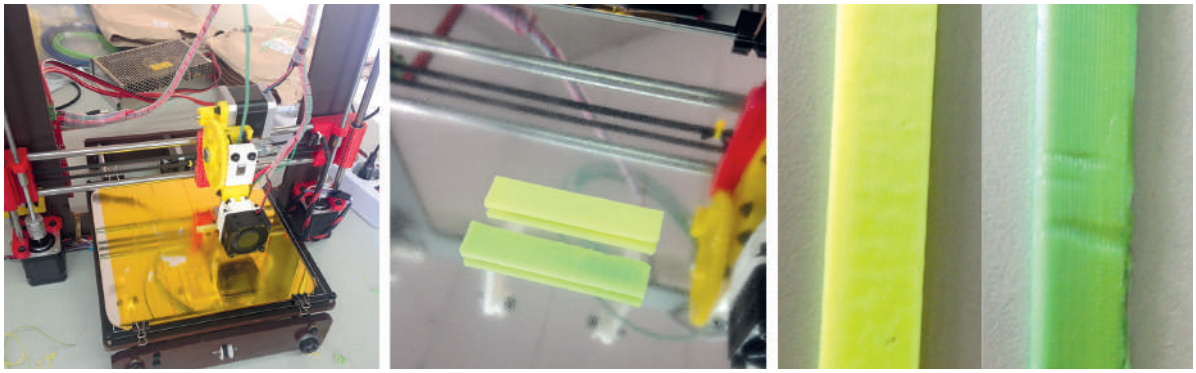


Figura 6.64 Experimentos con material termocrómico mediante impresión 3D

Materiales reactivos a la luz

· **Polímeros o tintas fotocrómicas:** el fotocromismo es un cambio reversible del color inducido por la luz o radiación ultravioleta de moléculas llamadas compuestos fotocrómicos (Hammarson, 2013). Bajo la influencia de la luz ultravioleta la molécula fotocromática cambia su configuración resultando en una eficaz forma absorbente de la luz visible, y así cuanto más intensa sea la luz incidente, más oscura será la superficie (Addington & Schodek, 2004). Este cambio es reversible puesto que cuando se elimina la fuente de radiación la molécula vuelve a su estado de reposo o inactivo (Hammarson, 2013). El uso de tipo de tintas sobre las superficies vidriadas de la envolvente proporcionaría una moderación de la luz recibida en el interior durante el día, y además ayudaría a prevenir la transmisión térmica no deseada de la radiación solar (Addington & Schodek, 2004).

6.9.2 Diseño adaptativo

En el apartado 6.6.3 se ha iniciado el proceso de exploración de los patrones estomáticos de las plantas más representativas de las regiones cálidas. Y aunque se ha observado cierto potencial en los patrones de los estomas (Figura 6.65) como herramienta para crear patrones innovadores para las envolventes de edificios, a través de la proporción de opacidad y transparencia en su superficie, aún no se han alcanzado resultados satisfactorios para la generación de patrones para envolventes arquitectónicas. Por ello se considera como un posible desarrollo futuro continuar con la exploración de los patrones estomáticos con el objetivo de extraer parámetros aplicables al diseño adaptativo de envolventes. Así, además de mediante el funcionamiento adaptativo, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a través de patrones definidos como criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño.

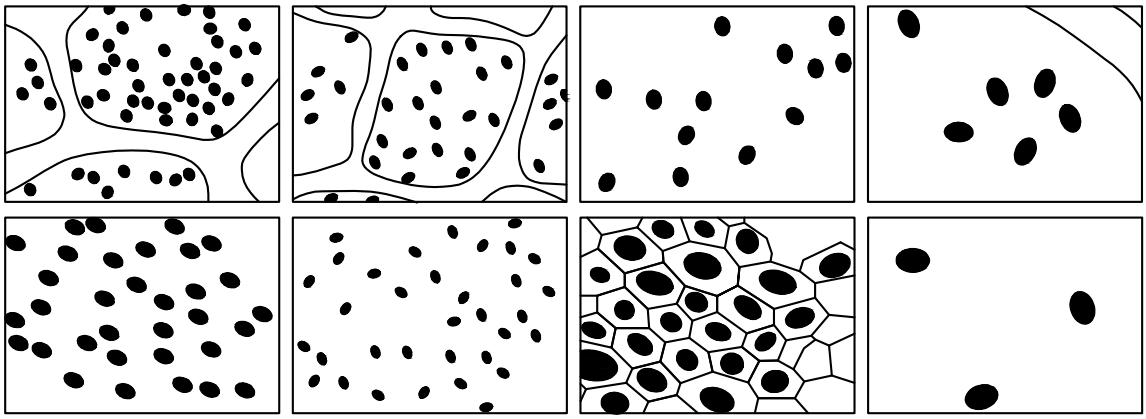


Figura 6.65 Patrones estomáticos de las plantas seleccionadas en climas cálidos.

6.10 Conclusiones

La mayoría de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en los climas cálidos, se resuelven mediante elementos mecánicos de protección solar, materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para enfriar la temperatura ambiente y disipar así el exceso de calor. Las soluciones comunes para hacer frente a la elevada radiación solar consisten en sistemas de sombreado para minimizar el aumento de calor, maximizar la luz del día y evitar el deslumbramiento. Dichos sistemas de control solar pueden ser mecanismos ajustables que generalmente no rastrean la radiación solar exacta en cada momento del día, o mecanismos móviles de gran complejidad para lograr un sombreado cinético y resultando en una adaptación alcanzada por medio de dispositivos que consumen energía eléctrica. Respecto a las tecnologías que disipan el exceso de calor, los dispositivos más utilizados para el enfriamiento son los sistemas de aire acondicionado, los cuales no contribuyen a reducir la demanda energética en los edificios, sino que la aumentan. Además estos sistemas rara vez suelen estar integrados en la envolvente desde el proceso inicial de diseño, lo que genera la aparición poco estética de elementos agregados tanto en el exterior como en el interior de la envolvente, como el caso de las cajas o unidades de aire acondicionado. Por todo ello, esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las condiciones climáticas cálidas definidas de una forma pasiva mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas.

A lo largo de este capítulo se han expuesto diferentes mecanismos y estrategias de adaptación que las plantas han desarrollado para hacer frente a los desafíos de las altas temperaturas, el déficit hídrico y el exceso de luz en las regiones de climas cálidos. Siguiendo las fases propuestas en la metodología "De las plantas a la arquitectura" se han explorado y valorado diferentes adaptaciones para una posible aplicación al diseño de envolventes. Se presenta una matriz de diseño con las funciones a desarrollar por la envolvente de climas cálidos, la cual propone 7 mecanismos dinámicos y 19 estrategias estáticas, haciendo un total de 26 posibles procesos biológicos como soluciones de aplicación. Para la generación del diseño conceptual se abordan los desafíos de las altas temperaturas y el exceso de radiación solar, mediante la selección de las siguientes funciones: disipar calor, protegerse de la radiación solar, e intercambiar aire con el exterior. Se seleccionan diversos mecanismos dinámicos y estrategias estáticas de la matriz de diseño como características dominantes que proporcionan pautas para la generación del diseño conceptual. Las adaptaciones seleccionadas son: la apertura estomática para enfriamiento por evaporación; la fotosíntesis CAM con apertura estomática por la noche; la pubescencia foliar y recubrimiento de ceras para disminuir el calentamiento y reflejar la radiación ultravioleta; el crecimiento en forma esférica para mantener un microclima interior más fresco; y los estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente.

El caso de diseño supone el primer paso hacia la implementación técnica, y se aborda desde la traducción gráfica de los principios biológicos en sistemas constructivos. En el "Caso de diseño 3" presentado, el mecanismo dinámico de apertura estomática nocturna se traduce gráficamente y de forma abstracta en un mecanismo reactivo de ventilación como proceso de refrigeración. Adicionalmente las estrategias estáticas seleccionadas en la matriz de diseño se traducen gráficamente, y también de forma abstracta, en estrategias reactivas de protección de la radiación solar.

Finalmente se aborda la posible materialización de los funcionamientos adaptativos expuestos a través de los materiales activos. Por ello, se estudian diversos materiales activos para su posible aplicación en el diseño conceptual presentado, mediante la presentación de un listado de posibles materiales activos y la realización de algunos experimentos.

Conclusions

Most of the existing solutions to achieve the adaptability of the envelope in warm climates are solved either by mechanical elements of sun protection or materials that provide insulation and technologies to cool the ambient temperature and thus dissipate excess heat. Common solutions for dealing with high solar radiation consist of shading systems to minimize heat build-up, maximize daylight and prevent glare. Such solar control systems may be adjustable mechanisms which generally do not track the exact solar radiation at each moment of the day. We may also include highly complex moving mechanisms for achieving kinetic shading and resulting in an adaptation achieved by means of electric power consuming devices. With regard to technologies that dissipate excess heat, most used devices for cooling are air conditioning systems, which do not contribute to reduce energy demand in buildings, but increase it. In addition, these systems are rarely integrated in the envelope from the initial design process, which generates an aesthetic appearance of attached elements both outside and inside the envelope. Therefore, this research proposes the adaptability of the envelope to warm climatic conditions defined in a passive way through new biomimetic design challenges based on the abstraction of plant adaptations.

Throughout this chapter we have discussed different adaptation mechanisms and strategies that plants have developed to face the challenges of high temperatures, water deficit and excess light in hot climates. Following the phases proposed in the methodology “From plants to architecture” different adaptations have been explored and evaluated for a possible application to the envelope design. A design matrix is presented with the functions to be developed by the warm climate envelope, which proposes 7 dynamic mechanisms and 19 static strategies, making a total of 26 possible biological processes as application solutions. For the generation of conceptual design, the challenges of high temperatures and excess solar radiation are addressed by selecting the following functions: dissipate heat, protect against solar radiation, and exchange air with the outside. Various dynamic mechanisms and static strategies of the design matrix are selected as key features that provide guidelines for the generation of conceptual design. The selected adaptations are: the stomatal opening for evaporative cooling; CAM photosynthesis with stomatal opening at night; foliar pubescence and wax coating to decrease warming and reflect ultraviolet radiation; growth in spherical form to maintain a cooler inner microclimate; and stomata protected in concavities so as not to receive direct sunlight.

The design case is the first step towards technical implementation, and is addressed from the graphic translation of biological principles in construction systems. In the "Design Case 3" presented, the dynamic sto-matal opening mechanism is translated graphically and abstractly into a reactive ventilation mechanism as a cooling process. In addition, the static strategies selected in the design matrix are translated graphically, and also abstractly, into reactive strategies for the protection of solar radiation.

Finally, the potential materialization of the adaptive operations exposed through the active materials is discussed. Therefore, various active materials are studied for their possible application in the conceptual design presented, by presenting a list of possible active materials and carrying some experiments out.

Referencias

Addington, M., Schodek, D., (2004) *Smart Materials and Technologies. For the Architecture and Design Professions.* Oxford, United Kingdom: Architectural Press.

Alcaraz F J., (2013) *Bioclimatología, Geobotánica*, Tema 2, Universidad de Murcia, disponible en http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema02.pdf (consultado en 2016).

Azcón-Bieto, J., Talón M., (2000) *Fundamentos de Fisiología Vegetal.* McGraw-Hill Interamericana/Edicions Universitat de Barcelona. ISBN 84-486-0258-7

Badarnah, L., (2012) *Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope adaptation.* Delft University of Technology.

Bilow, M., (2012) *International Façades - CROFT. Climate Related Optimized Façade Technologies*. A+BE | Architecture and the Built Environment, [S.l.], n. 1, p. 1-360, doi:http://dx.doi.org/10.7480/abe.2012.1., disponible en http://abe.tudelft.nl/index.php/faculty-architecture/article/view/bilow (consultado en 2016)

Bustamante W., (2009) *Guia de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.* División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa País de Efi- ciencia Energética (CNE), Santiago de Chile.

Coelho, M., Maes, P., (2009) *Shutters: a permeable surface for environmental control and communication.* In: Proceedings of the third international conference on tangible and embedded interaction, Cambridge, UK.

Compagno, A., (2002) *Intelligent Glass Facades: Materials, Practice, Design*, 5th ed. , Berlin: Birkhauser.

DB-HS, Documento Básico Salubridad, Código Técnico de la Edificación, disponible en http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf (consultado en 2016)

García J C, Biogeografía, Los factores de distribución de los seres vivos, Universidad de Cantabria, 2011 disponible en http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/biogeografia/materiales/pdfs-temas/2%2C%20Los%20factores%20de%20distribucion%20de%20los%20seres%20vivos.pdf (consultado en 2016)

Gibson, A. C., Nobel, P. S. (1986) *The Cactus Primer*. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Granados-Sánchez, D, López, R G F, Gama, Flores, J L, (1998) *Adaptaciones y estrategias de las plantas de zonas áridas*, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del ambiente 4(1): 169-178.

Hammarson, M., (2013) *Photochromism: Logic and Biologic Approaches*, Chalmers University of Technology.

Hausladen, G., Saldanha, M., & Liedl, P. (2008) *ClimateSkin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy*, Berlin: Birkhauser.

Howes, P., Laughlin, Z. (2012) *Material Matters: New Materials in design.* London, United Kingdom: Black Dog Publishing.

Jiang, H. Y., Kelch, S., Lendlein, A. (2006) *Polymers move in response to light.* Advanced Materials, 18(11), 1471-1475. doi: 10.1002/adma.200502266

Knaack, U., Tillmann, K., Bilow, M., & Auer, T. (2007) *Facades: Principles of Construction.* Basel: Birkhauser.

Kim Sung, D., (2013) *Metal that breathes*, On-line: TEDxUSC. Available at: http://www.ted.com/speakers/doris kim sung.html

Koch, K., Bhushan, B., and Barthlott, W., (2009) *Multifunctional surface structures of plants. An inspiration for biomimetics.* Philosophical Transactions of the Royal Society, 367, 1487-1509. doi: 10.1098/rsta.2009.0022

Laity, J. (2008). *Deserts and desert environment.* Wiley-Blackwell

Lendlein, A., Jiang, H. Y., Jürger, O., Langer, R., (2005) *Light-induced shape-memory polymers*, Nature 434, 879-882, doi:10.1038/nature03496

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles*. J Facade Des Eng;3(1):2015. http://dx.doi.org/10.3233/FDE-150026.

López M, Rubio R, Martín S, Croxford B, Jackson R., (2015) *Adaptive architectural envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control*. In: Proceedings of the 10th conference on advanced building skins, Bern, Switzerland; November 2015.

Parkin, I. P., & Manning, T. D. (2006) *Intelligent Thermochromic Windows*. Journal of Chemical Education, 83(3)

Perés-Martínez, J., Arizaleta, M., Sanabria, M.E., Brito, L., (2004) *Características de los estomas, densidad e índice estomático y su variación en función a la injestación en Annona muricata L. y A. montana MADFAC.* Bioagro, 16(3), 213-218.

Raven P.H, Evert R.F, Eichhorn, S.E, (1992) *Biología de las plantas*, Ed: Reverté S.A.

Reyes-López, D., Quiroz-Valentín, J., Kelso-Bucio, H., Huerta-Lara, M., Avendaño-Arrazate, C., & Lobato-Ortiz, R. (2015) *Caracterización estomática de cinco especies del género Vanilla.* Agronomía Mesoamericana, 26(2), 237-246. doi:http://dx.doi.org/10.15517/am.v26i2.19279

RITE, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios disponible en http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx (consultado en 2016).

Saeli, M., Piccirillo, C., Parkin, I.P., Binions, R., and Ridley, I. (2010) *Optimisation of Thermochromic Thin Films on Glass; Design of Intelligent Windows.* Advances in Science and Technology, 75.

Strauss, H., (2013) *AM Envelope. The potential of Additive Manufacturing for facade constructions*. A+BE | Architecture and the Built Environment, [S.l.], n. 1, p. 1-270. ISSN 2214-7233, disponible en http://abe.tudelft.nl/index.php/faculty-architecture/article/view/strauss (consultado en 2015) doi:http://dx.doi.org/10.7480/abe.2013.1.

Taiz L, Zeiger E., (2007) *Fisiologia Vegetal*, Volumen 1, Universidad Jaume I, Servicio de comunicación y publicaciones.

Toral, M, Manríquez, A, Navarro-Cerrillo, R, Tersi, D, & Naulin, P. (2010) C*aracterísticas de los estomas, densidad e índice estomático en secuoya (Sequoia sempervirens) y su variación en diferentes plantaciones de Chile*. Bosque (Valdivia), 31(2), 157-164. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000200009

Valladares F., (2004) *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante,* Ed. Ministerio de Medio Ambiente.

Walter, H., (1977) Zonas de vegetación y clima, Ed. Omega: Barcelona.

Ward, D. (2009) *The biology of deserts*. Oxford University Press, Oxford, 339 pp.

Weisser, P.; Weisser J.; Schrier K.; Robres, L., (1975) *Discovery of a subterronean Species of Neochilenia (Chileorebutia, thelocephalia)* In the Atacama Derert, Chile andnotes about its habitat Excelsa, 5, 97(c)99(c)104.

Whitford, W., (2002) *Ecology of desert systems*. Elsevier, London-San Diego, 343 pp.

Wolkoff P, Søren Kjærgaard K, (2007) *The dichotomy of relative humidity on indoor air quality,* Environment International, Volume 33, Issue 6, Pages 850-857, ISSN 0160-4120, http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2007.04.004.

WBCS, Worldwide Bioclimatic Classification System 1996-2017, disponible en http://www.globalbioclimatics.org/default.htm (consultado en 2017)

CAPÍTULO 7

Conclusiones

7.1 Revisión hipótesis de partida

La investigación presentada aborda la hipótesis de cómo *"la biomimética ofrece parámetros de diseño que mejoran conceptualmente la adaptabilidad al clima de las envolventes arquitectónicas."*

Como principal objetivo de la tesis se desarrolla una metodología de trabajo que permita entender los principios biológicos de adaptación según términos arquitectónicos y, basándose en ellos, poder generar diseños conceptuales de envolventes para edificios que se adaptan eficazmente a las condiciones climáticas del entorno. Por ello, se presenta la metodología "De las plantas a la arquitectura" como una herramienta útil para ingenieros y arquitectos durante las primeras etapas de diseño en el proyecto constructivo. Ésta, ayuda a entender cómo se pueden utilizar los principios de adaptación encontrados en las plantas en la Naturaleza para crear envolventes en edificios, explorando así nuevos caminos para lograr el ahorro energético en las edificaciones y contribuir a reducir el impacto ambiental, desde el diseño y comportamiento de la envolvente, sin depender únicamente de sistemas convencionales de acondicionamiento interior, tal y como se viene haciendo hasta ahora. Es importante señalar que la finalidad de este trabajo no es crear un estándar de diseño, sino la creación de conocimiento de soluciones de adaptación de la Naturaleza que ofrecen la posibilidad de ser transferidas a soluciones de diseño para envolventes con capacidad de adaptación a su entorno.

Para responder a la hipótesis de partida, se formularon una serie de cuestiones, las cuales se abordaron en detalle en los capítulos anteriores. A continuación se presenta un resumen de sus respuestas:

P.1: *¿Cómo puede la naturaleza ayudarnos en la creación de un nuevo tipo de cerramiento exterior de edificios capaz de adaptarse e interactuar con su entorno al igual que lo hacen las envolventes del mundo natural?*

A lo largo del capítulo 2 se ha expuesto la falta de adaptabilidad de la envolvente a su entorno climático como una contribución negativa en el rendimiento y la eficiencia energética de los edificios. Por el contrario, en la Naturaleza los organismos responden al ambiente y son capaces de adaptarse a las condiciones cambiantes de cada clima. Por ello se recurre al estudio de las envolventes en la Naturaleza y se estudian las posibilidades de desarrollo de un nuevo tipo de envolvente no mediante las superficies inertes tradicionales, sino como un revestimiento vivo, basadas en el comportamiento de las envolventes naturales exploradas.

Aunque la Naturaleza siempre ha estado presente en la arquitectura, siendo una fuente de inspiración en el proceso de diseño a través de las formas o estructuras de organismos naturales (véase capítulo 2, apartado 2.4), esta investigación busca soluciones en los principios funcionales biológicos. Por ello se emplea la ciencia de la biomímesis o biomimética para generar diseños conceptuales de envolventes para edificios basándose en la abstracción de las adaptaciones biológicas. Pues, a diferencia del biomorfismo, como una simple traducción de las formas biológicas a la arquitectura, en la biomimética la transferencia se produce a nivel de rendimiento, a través del análisis de las estrategias llevadas a cabo, tanto en biología como en ingeniería, para la resolución de problemas. En el capítulo 2 se presentan varios casos de estudio en los que se emplea la biomímesis como herramienta en la arquitectura para generar nuevos diseños de envolventes adaptativas.

P.2: *¿Qué tipo de metodologías, que desarrollen envolventes arquitectónicas basadas en procesos y estrategias de la naturaleza se han realizado hasta el momento?*

Los sistemas encontrados en la naturaleza ofrecen una gran base de datos de estrategias y mecanismos que pueden implementarse en diseños biomiméticos. Sin embargo, la selección de dichos modelos naturales y su transferencia tecnológica es un desafío al que se enfrentan los ingenieros y arquitectos. Por ello, antes de desarrollar la metodología "De las plantas a la arquitectura", se han estudiado las estrategias que diversos grupos de investigación han desarrollado para la generación de conceptos de diseño inspirados en la naturaleza.

En el capítulo 2 se analiza la biomímesis y su aplicación arquitectónica teniendo en cuenta el posible potencial que ofrece a la hora de desarrollar sistemas envolventes para edificios más parecidos a las envolventes de la naturaleza, con capacidad de interactuar con el medio a través de superficies adaptativas. Para ello se han estudiado diversos trabajos de investigación que han intentado llevar a cabo diferentes metodologías para desarrollar nuevas envolventes en edificios según principios biomiméticos.

Como proyectos construidos se han analizado tres casos de estudio: Flectofin®, el pabellón "One Ocean Thematic Pavilion" y el pabellón "HygroSkin". Se trata de sistemas inspirados en las plantas, que interactúan con el medio ambiente exterior y responden a sus cambios a través de la capacidad de movimiento para realizar intercambios energéticos. Con el estudio de estos sistemas experimentales se puede ver el potencial de la biomímesis como una herramienta de diseño para mejorar la eficiencia energética en edificios.

Además de proyectos construidos citados, también se han analizado y comparado otros trabajos de investigación académica. Se han seleccionado los estudios teóricos "BioSkin", "Towards the living envelope" y "Architecture follows nature" como las líneas de investigación más relevantes. En todas ellas, se estudian los principios biológicos para su aplicación en metodologías biomiméticas innovadoras de generación de diseños conceptuales de envolventes en edificios.

En el capítulo 3 se presentan los grupos de investigación biomiméticos que más se han consultado en la elaboración de este trabajo: "BioTriz", "Biomimicry 3.8" y "Plant Biomechanics Group". Además se exponen, con ejemplos, los dos enfoques o aproximaciones a la metodología biomimética recogidos de la revisión literaria. Estos son: proceso "*bottom-up"* ó "*biology to design",* y proceso "*top-down"* ó "*challenge to biology"*, dependiendo del problema a resolver. También se conocen como "basado en la solución" ó "basado en el problema", respectivamente.

P.3: *¿Cuáles son las principales ventajas y limitaciones de dichas metodologías actuales, en el desarrollo de diseños arquitectónicos inspirados en la naturaleza?*

Del estudio y análisis de las diferentes metodologías biomiméticas se deduce que estos procesos de investigación incluyen varios niveles de abstracción y modificación, en los que intervienen expertos de diversas áreas, como biólogos, químicos, físicos, ingenieros o arquitectos, haciendo de la biomímesis una ciencia extremadamente interdisciplinar.

Dichas metodologías proporcionan pautas sobre cómo abordar la exploración de los organismos en la Naturaleza, además de recursos para facilitar las primeras fases de indagación y recogida de información biofísica. La base de datos online de las colecciones de AskNature es un ejemplo de este tipo de ayuda. Además de esta ventaja, las metodologías citadas también ofrecen sistemas de clasificación de la información biológica obtenida. En la presente investigación se ha tomado como referencia la Taxonomía Biomimética, la cual organiza la biología según la función (revisar capítulo 3, apartado 3.4.2).

Sin embargo, a pesar de que éstas metodologías ofrecen ciertos criterios para abordar los procesos de diseño, éstos son demasiado genéricos. Y la ausencia de una herramienta de diseño sistemática, para la identificación de los principios biológicos relevantes y su aplicación a la generación de diseños conceptuales, se considera una limitación. Además, al abordar un proyecto biomimético desde un perfil de ingeniería, la inmersión en la biología y su comprensión supone un gran reto. Por todo ello, se valora de utilidad la creación de una herramienta de diseño, para ingenieros y arquitectos, que facilite la transición desde la inspiración biológica hacia la implementación técnica con una traducción de lenguaje biológico-técnico.

P.4: *¿Es posible generar diseños conceptuales para sistemas envolventes de edificios que regulen los aspectos ambientales de cada zona climática, basándose en estrategias de adaptación de las plantas?*

A lo largo del capítulo 3 se presenta la metodología creada en esta investigación, llamada "De las plantas a la arquitectura". Se trata de una metodología ideada para desarrollar aplicaciones en el sector de la construcción. Pues, aunque en los últimos años se ha comenzado a emplear la biomimética a la arquitectura, existe una limitada disponibilidad de recursos específicos para tal práctica. Por tanto la finalidad de la metodología es servir como herramienta para generar diseños conceptuales de envolventes, de acuerdo a una selección de diversas estrategias y mecanismos de adaptación de algunas plantas a sus respectivos hábitats. La metodología propuesta consiste en diversas fases de trabajo (Figura 7.1), que acompañadas de diferentes diagramas, esquemas y tablas facilitan la transición desde la inspiración biológica hacia la implementación técnica.

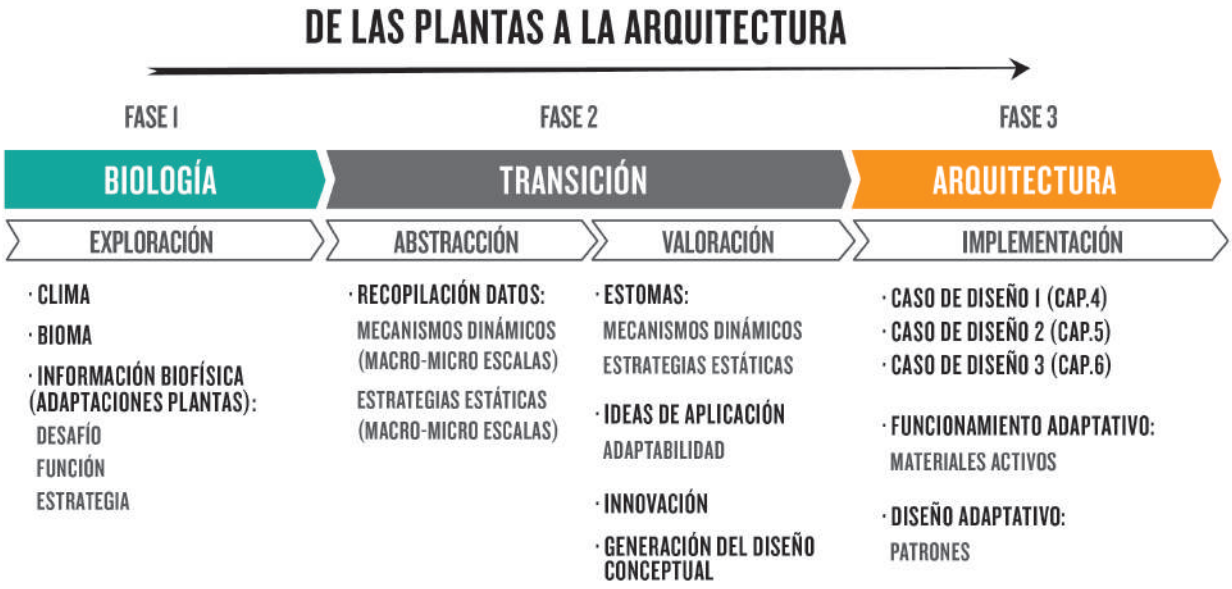


Figura 7.1
Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

"De las plantas a la arquitectura" consiste en la observación de las adaptaciones de las plantas a su entorno, y cómo esta percepción desencadena una idea de aplicación para la creación de diseños de envolventes arquitectónicas vivas con capacidad de adaptación a las condiciones climáticas definidas en su entorno. Los principales pasos a seguir, exploración, abstracción, valoración e implementación, se encadenan de forma lineal para lograr la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas.

Los capítulos 4, 5 y 6 consisten en la validación de esta metodología, pues siguiendo las fases establecidas se generan tres casos de diseño conceptuales de envolvente arquitectónica, basados en diversas adaptaciones de las plantas a los climas fríos, templados o cálidos. Por tanto, sí es posible generar diseños conceptuales para sistemas envolventes de edificios que regulen los aspectos ambientales de cada zona climática, basándose en estrategias de adaptación de las plantas.

P.5: *¿Cómo clasificar y sintetizar las soluciones de adaptación identificadas en las plantas para su uso por arquitectos e ingenieros?*

A lo largo del capítulo 3 se ha explicado cómo la exploración de la biomecánica y morfología funcional de las plantas seleccionadas en los diferentes biomas se organiza según su desafío, función y estrategia. Sin embargo, la categorización y organización de la información biofísica obtenida supone un reto y por ello se estima oportuno realizar una nueva ordenación de las adaptaciones de las plantas. Por ello, esta investigación propone una clasificación novedosa, con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas.

Para conectar la biología con la arquitectura se crea una *data collection* o recopilación de datos que organiza los diferentes ejemplos de adaptación considerados de interés en las diferentes áreas climáticas. La clasificación propuesta ordena los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas a su entorno según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental (temperatura, humedad, luz o dióxido de carbono). Como mecanismos dinámicos (MD) se consideran aquellas plantas que responden a estímulos externos a través del movimiento. La investigación se centra en aquellas plantas que son receptivas, es decir, que exhiben movimientos rápidos y reactivos en una escala de tiempo que podemos percibir, como respuesta a cambios en el medio que las rodea. Como estrategias estáticas (EE) se consideran aquellas propiedades multifuncionales de las hojas de las plantas que proporcionan más de una solución de adaptación a las condiciones ambientales. A su vez, los mecanismos dinámicos o las estrategias estáticas se subdividen según el factor de observación en la escala macro o micro. Por tanto, el sistema de clasificación propuesto organiza los ejemplos biológicos explorados por su adaptación al entorno, según este sistema estructural se considere mecanismo dinámico o estrategia estática, en cada tipo de clima y de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

En los capítulos 4, 5 y 6, en el apartado "Clasificación de datos" se presenta la ordenación de los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas al entorno de regiones frías, templadas o cálidas según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental seleccionado.

P.6: *¿Qué métodos de construcción se han utilizado previamente en las diferentes zonas climáticas para adaptarse de forma eficaz al clima local?*

A lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 se presenta un estudio de los desafíos a los que tienen que hacer frente las envolventes de cada zona climática, según los parámetros ambientales de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono, específicos de cada región. A continuación se introducen las estrategias necesarias para alcanzar la adaptabilidad la envolvente a las condiciones específicas de cada región climática. Y se incluyen diagramas que sintetizan los procesos a desarrollar por la envolvente, de acuerdo a las funciones definidas para hacer frente a los desafíos de cada clima. Finalmente, se introduce el concepto de innovación, para intentar mostrar el posible beneficio o las ventajas de la metodología de diseño biomimético, en el diseño de nuevas envolventes arquitectónicas o en aplicaciones de rehabilitación, en comparación con los sistemas de construcción estándar según criterios de eficiencia energética.

Así, para cada zona climática, se hace una breve exposición de las soluciones existentes para lograr la adaptabilidad de la envolvente en dichos climas:

En los **climas fríos,** por ejemplo, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a las condiciones de bajas temperaturas y escasez de luz durante el invierno mediante estrategias de captación de la radiación solar, conservación del calor en el interior y ventilación para mantener la calidad del aire interior. La mayoría de las soluciones existentes para lograrlo se resuelven mediante materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para calentar la temperatura ambiente mediante radiadores; sistemas de calefacción por suelo radiante; convectores de emisión de calor por convección; o sistemas de aire acondicionado. Normalmente los aparatos térmicos se fijan a las paredes, o se acoplan en los techos o suelos de las estancias, ocupando grandes superficies de espacio, además de las salas destinadas a la combustión para la generación de calor. Asimismo, el uso de este tipo de instalaciones contribuye al aumento de la demanda energética en los edificios. Además la hermeticidad de la envolvente hace que actúe como una barrera entre el ambiente exterior y los espacios interiores, reduciendo la calidad del aire interior y disminuyendo la satisfacción de los ocupantes.

En los **climas templados,** la adaptabilidad se alcanzará mediante estrategias de captación de la radiación solar y conservación del calor en el interior durante los meses fríos; protección de las ganancias solares y extracción del calor generado en el interior por enfriamiento durante los meses cálidos; y ventilación para mantener la calidad del aire interior. Las soluciones existentes para lograr el confort térmico tanto en verano como en invierno se detallan con profundidad en los capítulos 4 y 6 respectivamente. Respecto a la humedad, la envolvente debe evitar el conflicto entre la regulación de los niveles de humedad y las posibles pérdidas de calor durante los meses fríos. En muchas ocasiones, debido a la hermeticidad de la envolvente, pueden aparecer problemas de condensación. Las soluciones comunes para regular los niveles de humedad en el interior, consisten en tecnologías de tratamiento del aire y deshumidificación. Estos sistemas no contribuyen a reducir la demanda energética en los edificios, sino que la aumentan. Además de generar problemas de ruido que pueden disminuir la satisfacción de los ocupantes. Y también se valora la condición de elevada humedad atmosférica y precipitaciones que ofrece el clima templado como una oportunidad para el diseño de envolventes que funcionen como colectores de agua.

En los **climas cálidos,** la envolvente alcanzará la adaptabilidad a las condiciones de elevadas temperaturas, intensa radiación solar y escasa humedad relativa mediante estrategias de protección de las ganancias solares, extracción del calor generado en el interior por enfriamiento, ventilación para mantener la calidad del aire interior, y recogida y almacenamiento de agua. Las soluciones comunes consisten en elementos mecánicos de protección solar, materiales que proporcionan aislamiento y tecnologías para enfriar la temperatura ambiente y disipar así el exceso de calor. Los sistemas comunes de control solar pueden ser mecanismos ajustables que generalmente no rastrean la radiación solar exacta en cada momento del día, o mecanismos móviles de gran complejidad, resultando en una adaptación alcanzada por medio de dispositivos que consumen energía eléctrica. Respecto a las tecnologías que disipan el exceso de calor, los dispositivos más utilizados para el enfriamiento son los sistemas de aire acondicionado, los cuales no contribuyen a reducir la demanda energética en los edificios, sino que la aumentan. Además estos sistemas rara vez suelen estar integrados en la envolvente desde el proceso inicial de diseño, lo que genera la aparición poco estética de elementos agregados tanto en el exterior como en el interior de la envolvente, como el caso de las cajas o unidades de aire acondicionado.

Debido a los inconvenientes observados en los sistemas empleados comúnmente en las envolventes de los edificios, se sugiere un nuevo tipo de adaptabilidad. Y esta investigación propone la adaptabilidad de la envolvente a las diferentes condiciones climáticas de una forma pasiva, mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas. Los principios biológicos derivados de las adaptaciones de las plantas a su entorno pueden mejorar la innovación, y se proponen algunas ideas de diseño, teniendo en cuenta sus retos y posibles beneficios.

P.7: *¿Es posible obtener una mayor adaptabilidad en la construcción de muros exteriores de edificios imitando la Naturaleza frente a las fachadas de los edificios que siguen procesos convencionales?*

A través del análisis de las soluciones existentes en los sistemas empleados comúnmente para lograr la adaptabilidad en las envolventes se observan una serie de inconvenientes y desventajas. Debido a esto, se sugiere un nuevo tipo de adaptabilidad de la envolvente a las diferentes condiciones climáticas de una forma pasiva, mediante nuevos retos de diseño biomiméticos basados en la abstracción de las adaptaciones de las plantas. Los casos de diseño presentados a lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 demuestran, de una forma teórica y conceptual, que sí es posible obtener una mayor adaptabilidad en la construcción de muros exteriores de edificios imitando la Naturaleza frente a las fachadas de los edificios que siguen procesos convencionales. Así, para cada tipo de clima se proponen las siguientes soluciones de control pasivo que pueden contribuir a una disminución en el consumo de energía en el interior del edificio:

Para climas fríos: sistema reactivo que permite la ventilación para lograr la calidad del aire interior minimizando las pérdidas de calor; y estrategias reactivas de captación de la radiación solar y conservación del calor generado.

Para climas templados: un mecanismo reactivo de regulación de los niveles de humedad interiores; y un sistema de captación del agua exterior.

Para climas cálidos: un mecanismo reactivo de ventilación, como proceso de refrigeración nocturna; y estrategias reactivas de protección de la radiación solar.

Sin embargo, los casos de diseño presentados proporcionan únicamente soluciones desde un punto de vista teórico o conceptual, y al no haber realizado una evaluación sobre un sistema real construido, no se puede cuantificar el rendimiento ni evaluar la innovación aportada. En el apartado 7.3 se plantea el ensayo real de estos diseños como un posible desarrollo futuro de la investigación.

P.8: *¿Cómo determinar la viabilidad de la creación de una envolvente arquitectónica que reacciona a los diferentes estímulos externos y regula necesidades de confort del interior como si de un organismo vivo se tratase?*

La viabilidad vendrá dada por la amortización de la investigación y su desarrollo. Para ello serán necesarias mediciones reales sobre el comportamiento y rendimiento energético de los diseños propuestos. También habrá que estimar los procesos de fabricación para su implementación, como por ejemplo el estado de desarrollo y disponibilidad de los materiales reactivos pretendidos. Aunque la evaluación de todas estas cuestiones suponen un reto, con la investigación presentada en esta tesis se plantean las bases para su respuesta en un futuro.

7.2 Discusión final

7.2.1 Contribuciones

Los aspectos novedosos de esta tesis, en comparación con otros trabajos realizados sobre envolventes arquitectónicas biomiméticas, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La investigación presentada en esta tesis se basa sólo en las hojas de las plantas y sus estrategias de adaptación a diferentes climas. Las plantas, debido a su inmovilidad como individuos, son un excelente material biológico para detectar fenómenos climáticos. Los animales, a diferencia de las plantas, pueden ocultarse o buscar protección de los elementos y por ello son rechazados como fuente de inspiración en esta investigación. Se busca la relación entre las plantas y los edificios a través de esa falta de movimiento y la sujeción o permanencia a una ubicación específica, lo que implica la exposición a los cambios ambientales y la resistencia a las condiciones climáticas que les afectan en todo momento. Sin embargo, las plantas, a diferencia de los edificios, han sabido adaptarse al medio a través de procesos de evolución a lo largo de millones de años. Por ello, se estudian las estrategias de adaptación desarrolladas únicamente por las plantas a su entorno en diferentes áreas climáticas. Dichas adaptaciones son el punto clave de este trabajo y es lo que lo hace diferente de otros estudios de temática similar. Otras investigaciones también se han fijado en las plantas para una posible transferencia a términos arquitectónicos (véase capítulo 2, apartado 2.6.3). Sin embargo, estos proyectos abordan el estudio de las plantas desde un tipo de adaptación morfológica, según orientación o parámetros geométricos y de distribución y no tomando como prioridad la adaptación al clima, que es la clave de esta tesis y lo que marca la diferencia con el resto de investigaciones.

- En la metodología creada "De las plantas a la arquitectura" se proporciona una clasificación novedosa para organizar los diferentes ejemplos de adaptación considerados de interés en las diferentes áreas climáticas. Como se ha explicado previamente, al responder a la pregunta 5, la clasificación propuesta ordena los sistemas estructurales de adaptación de las hojas de las plantas a su entorno según mecanismos dinámicos ó estrategias estáticas, de acuerdo a cada parámetro ambiental (temperatura, humedad, luz o dióxido de carbono). Esta clasificación se ha realizado con el objetivo de facilitar la transferencia de conocimiento desde la inspiración en las plantas hasta el desarrollo de nuevas soluciones arquitectónicas. Y como parte de la metodología desarrollada, su finalidad es servir como herramienta de utilidad para ingenieros y arquitectos que deseen desarrollar soluciones de envolventes basadas en las estrategias y mecanismos de adaptación de las plantas, seleccionadas por su potencial.

7.2.2 Limitaciones y desafíos

La investigación presentada proporciona una selección de mecanismos y estrategias de adaptación explorados en las hojas de las plantas de las diferentes zonas climáticas europeas. Se han elegido las adaptaciones y ejemplos biológicos más representativos de cada zona. Sin embargo, para recoger en una base de datos fidedigna el vasto repertorio de organismos que proporciona la Naturaleza, incluidos los análisis fisiológicos pormenorizados, sería necesaria una mayor investigación en estrecha colaboración con biólogos.

También podría considerarse una limitación el hecho de que los casos de diseño presentados proporcionan únicamente soluciones desde un punto de vista teórico o conceptual, planteando la viabilidad de su implementación mediante tecnologías de fabricación demasiado novedosas e incluso sin valorar su costo económico.

La vía de investigación iniciada con el estudio de los patrones estomáticos se valora finalmente como un desafío a desarrollar en futuros proyectos. Se ha observado cierto potencial en los patrones de los estomas como herramienta para crear patrones innovadores para las envolventes de edificios, a través de la proporción de opacidad y transparencia en su superficie. Aunque esta tesis ha iniciado el proceso de exploración de los patrones estomáticos de las plantas más representativas de cada zona climática (véase los apartados "Estomas como estrategias estáticas" en los capítulos 4, 5 y 6), no se han alcanzado resultados satisfactorios para la generación de patrones para envolventes arquitectónicas.

7.3 Desarrollos futuros

Teniendo en cuenta los objetivos planteados en esta tesis, así como las conclusiones de la misma, a continuación se presentan posibles desarrollos futuros que derivan del trabajo realizado en esta línea de investigación referente al diseño e implementación técnica de envolventes arquitectónicas según criterios biomiméticos:

- **Estimación del rendimiento de los casos de diseño propuestos:** aunque la finalidad de este trabajo no es crear un estándar de diseño, sino la creación de conocimiento de soluciones de adaptación de la Naturaleza, se considera como posible desarrollo futuro profundizar en la estimación del rendimiento de los casos de diseño propuestos en los capítulos 4, 5 y 6.

- **Profundizar en el concepto de diseño adaptativo:** dado el potencial observado en los patrones de los estomas como herramienta para crear patrones innovadores para las envolventes de edificios, a través de la proporción de opacidad y transparencia en su superficie. Por ello se considera como un posible desarrollo futuro continuar con la exploración de los patrones estomáticos con el objetivo de extraer parámetros aplicables al diseño adaptativo de envolventes. Así, además de mediante el funcionamiento adaptativo, la envolvente alcanzará la adaptabilidad a través de patrones definidos como criterios estratégicos en las decisiones formales del diseño.

- **Desarrollar la implementación técnica:** esta fase incluye el desarrollo de los diseños conceptuales en soluciones técnicas mediante la aplicación de tecnologías avanzadas. Se consideran como posibles desarrollos futuros:

    - Actualizar y completar la búsqueda de materiales activos.
    - Creación de sistemas híbridos o compuestos que incorporan múltiples funcionalidades con el objetivo de controlar simultáneamente, a través de un sólo mecanismo, varios parámetros ambientales.
    - Realización de prototipos y fabricación de elementos a escala.
    - Evaluación del sistema, bajo condiciones ambientales reales, y los resultados alcanzados, mediante técnicas de medición ya establecidas en la industria.

CHAPTER 7

Conclusions

7.1 Research questions revisited

The hypothesis addressed in this dissertation is:

"Biomimetics offers design parameters that improve conceptually the climate adaptability of architectural envelopes".

The main objective of the thesis is to create a working methodology that allows to understand the biological principles of adaptation according to architectural terms. Thus, conceptual designs for building envelopes are generated to adapt effectively to environmental conditions. Therefore, the methodology "From plants to architecture" is presented as a useful tool for engineers and architects in the early design stages in the building project. This procedure helps us to understand how the adaptation principles found in plants in Nature may be used to create building envelopes, exploring new ways to achieve energy savings in buildings. They contribute to reducing environmental impacts, from the design and behavior of the envelope, without relying only on conventional indoor conditioning systems, as has been done so far. It is important to stress that the purpose of this work is not to create a design standard, but to create knowledge of Nature's adaptation solutions that offer the possibility of being transferred to design solutions for envelopes with the capacity to adapt to their environment.

In order to validate the hypothesis, the following sub-questions were addressed in detail in the previous chapters. A summary of their answers is presented as follows:

Q.1: *How can Nature help us in the creation of a new type of exterior building wall capable of adapting and interacting with its environment just like the natural world?*

Throughout Chapter 2 it has been exposed that the lack of adaptability of the envelope to its climatic environment supposes a negative contribution in the performance and the energy efficiency of the buildings. On the contrary, organisms found in Nature respond to the environment and are able to adapt to the changing climatic conditions. That is the main reason the envelopes in Nature are studied. And the possibilities of developing a new type of envelope are studied, not by means of traditional inert surfaces, but as a live coating, based on the behavior of the explored natural envelopes.

Nature has always been present in architecture, being a source of inspiration in the design process through the forms or structures of natural organisms (see Chapter 2, section 2.4). However, this research seeks solutions in biological functional principles. For this reason, the science of biomimicry or biomimetics is used to generate conceptual designs of envelopes for buildings based on the abstraction of biological adaptations. Unlike biomorphism, as a simple translation of biological forms into architecture, the transfer in biomimetics occurs at the level of performance, through the analysis of the strategies carried out to solve problems, both in biology and engineering. In Chapter 2 several study cases are presented, in which biomimicry is used as a tool in architecture to generate new designs of adaptive envelopes.

Q.2: *What kind of methodologies, which develop architectural envelopes based on processes and strategies of Nature, have been put forward so far?*

Systems found in Nature offer a large database of strategies and mechanisms that may be implemented in biomimetic designs. However, the selection of these natural models and their technological transfer is a challenge that engineers and architects have to face. Therefore, before developing *"From plants to architecture"* methodology, strategies for the generation of Nature-based concepts developed by different research groups have been studied.

In Chapter 2, biomimetics and its architectural application are analysed taking into account their potential in the development of Nature-based envelope systems for buildings, with the capacity to interact with the environment through adaptive surfaces. In order to do so, several research projects that have tried to carry out different approaches to develop new envelopes in buildings according to biomimetic principles, have been studied.

Three study cases have been mainly analized: *Flectofin*®, the *"One Ocean Thematic Pavilion"* and the *"HygroSkin"* pavilion. These are systems inspired by plants, which interact with external environments and respond to their changes through their ability to move, to make energy exchanges. Through the study of these experimental systems the potential of biomimicry as a design tool to improve energy efficiency in buildings is appreciated.

In addition to these projects, other academic researchs have also been analysed and compared. Theoretical studies *"BioSkin"*, *"Towards the living envelope"* and *"Architecture follows Nature"* have been selected as the most relevant research lines. In all of them, biological principles are studied for their application into innovative biomimetic methodologies for design concept generation of building envelopes.

In Chapter 3, the most consulted biomimetic research groups in the elaboration of this thesis are presented: *"BioTriz"*, *"Biomimicry 3.8"* and *"Plant Biomechanics Group"*. In addition, two approaches to the biomimetic methodology collected from the literary review are presented with examples. These are: *"bottom-up"* or *"biology to design"*, and *"top-down"* or *"challenge to biology"*, depending on the problem to be solved. They are also known as *"solution-based"* or *"problem-based"*, respectively.

Q.3: *What are the main advantages and limitations of these current methodologies in the development of architectural designs inspired by Nature?*

From the study and analysis of the different biomimetic methodologies, it follows that these research processes include various levels of abstraction and modification, involving experts from different areas, such as biologists, chemists, physicists, engineers or architects, making biomimicry an extremely interdisciplinary science.

These methodologies provide guidelines about how to approach the exploration of organisms in Nature, as well as resources to facilitate the early stages of biophysical information collection. The online database of AskNature is an example of this kind of help. In addition to this advantage, the mentioned methodologies also offer systems of classification of the biological information obtained.

In the present research, the Biomimetic Taxonomy has been taken as a reference, which organizes biology according to function (see Chapter 3, section 3.4.2).

However, although these methodologies offer certain criteria for addressing design processes, they are also too generic. The absence of a systematic design tool for the identification of relevant biological principles and their application to the generation of conceptual designs, is considered a limitation. In addition, when approaching a biomimetic project from an engineering point of view, immersion in biology and its understanding is a big challenge. Therefore, it is useful to create a design tool for engineers and architects to facilitate the transition from biological inspiration to technical implementation with a biological-technical language translation.

Q.4: *Is it possible to generate conceptual designs for building envelope systems that regulate the environmental aspects of each climatic zone, based on plant adaptation strategies?*

The methodology created in this research, named "From plants to architecture", is presented throughout Chapter 3. It is a methodology designed to develop applications in the construction sector. Although biomimetics have been used in architecture in recent years, there is a limited availability of specific resources for such practice. Therefore, the purpose of this methodology is to serve as a tool to generate conceptual designs of envelopes, according to a selection of different strategies and mechanisms of adaptation of some plants to their respective habitats. The proposed methodology involves several phases of work (Figure 7.1), which, accompanied by different diagrams, drawings and tables, facilitate the transition from biological inspiration to technical implementation.

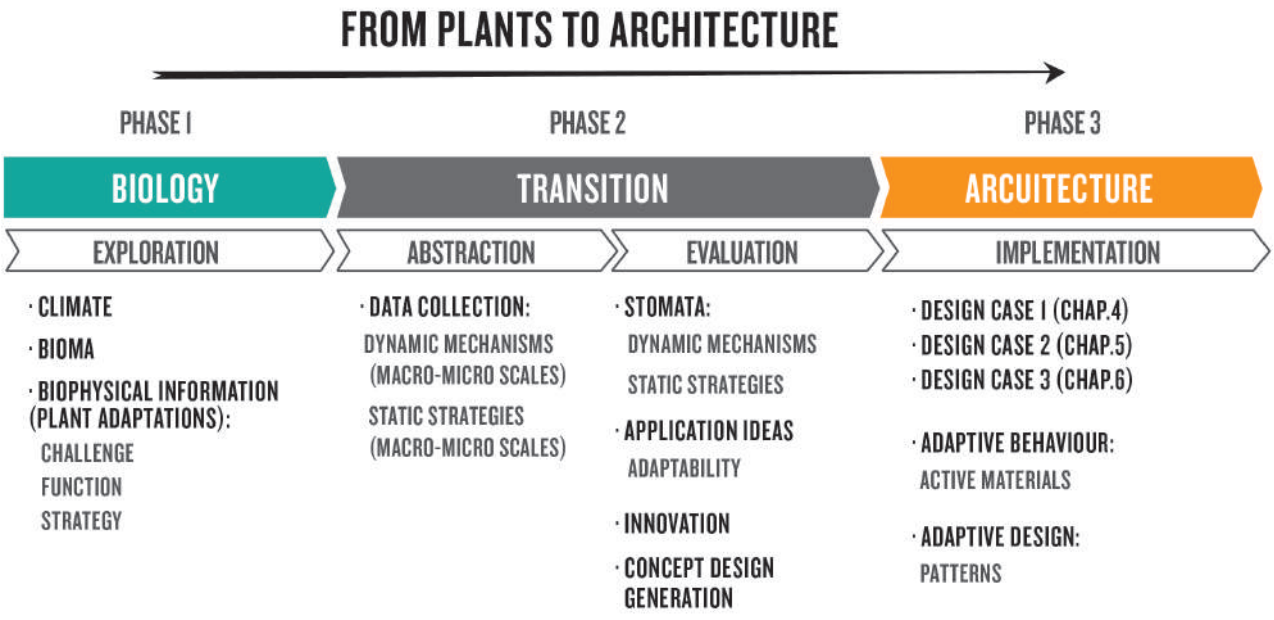


Figure 7.1 Graphic concept of the *"From plants to architecture"* methodology.

"From plants to architecture" consists of observing adaptations of the plants to their environments, and how this perception triggers an idea of application for creation of designs of living architectural envelopes with capacity to adapt themselves to the climatic conditions defined in its environment. The main steps to follow (exploration, abstraction, assessment and implementation) are chained in a linear way to achieve the transfer of knowledge from plants inspiration to the development of new architectural solutions.

Chapters 4, 5 and 6 involve the validation of this methodology, since following the established phases, three conceptual design cases of architectural envelope are generated, based on diverse adaptations of the plants to the cold, temperate or warm climates. Therefore, it is possible to generate conceptual designs for building envelope systems that regulate the environmental aspects of each climatic zone, based on plant adaptation strategies.

Q.5: *How do we classify and synthesize the adaptation solutions identified in the plants for use by architects and engineers?*

Throughout Chapter 3 it has been explained how the exploration of the biomechanics and functional morphology of the selected plants in the different biomes is organized according to its challenge, function and strategy. However, the categorization and organization of the biophysical information obtained is a challenge. Therefore, it is considered appropriate to carry out a new arrangement of plant adaptations. For this reason, this research proposes a new classification, with the aim of facilitating the transfer of knowledge from the plants inspiration to the development of new architectural solutions.

To connect biology with architecture, a data collection is created, which organizes the different adaptation examples considered of interest in different climatic areas. The proposed classification orders the structural systems of the plant leaves adaptations to their environment according to dynamic mechanisms or static strategies, depending on each environmental parameter (temperature, humidity, light or carbon dioxide). Those plants that respond to external stimuli through movement are considered as dynamic mechanisms (DM). The research focuses on those plants that are receptive, that is, exhibit rapid and reactive movements on a scale of time that we can perceive, as a response to changes in their environment. As static strategies (EE) are considered those multifunctional properties of leaves of plants that provide more than one solution to adapt to environmental conditions. At the same time, the dynamic mechanisms or the static strategies are subdivided according to the factor of observation in the macro or micro scale. Therefore, the proposed classification system organizes the biological examples explored by their adaptation to the environment, according to its structural system is considered a dynamic mechanism or static strategy, in each type of climate and depending on each selected environmental parameter.

In Chapters 4, 5 and 6, the "Data Classification" section presents the arrangement of structural systems for plant adaptations to the environment of cold, temperate or warm regions, according to dynamic mechanisms or static strategies, depending on temperature, humidity, light or carbon dioxide.

Q.6: *What methods of construction have been previously used in the different climatic zones to adapt effectively to the local climate?*

Chapters 4, 5 and 6 present a study of the challenges that envelopes have to face for each climatic zone, according to the specific environmental parameters of temperature, humidity, light and carbon dioxide. Next, required strategies to achieve adaptability to the specific conditions of each climatic region are exposed. In addition, diagrams that synthesize the processes to be developed by the envelope, according to the functions defined to face the challenges of each climate, are included. Finally, the innovation concept is presented, with the aim of showing the potential benefits or advantages of the biomimetic design methodology, for the design of new architectural envelopes or in refurbishment applications, compared to the standard construction systems according to criteria of energy efficiency.

Thus, for each climatic zone, a brief exposition of the current solutions to achieve the adaptability of the envelope in these climates is made:

In **cold climates,** most of the existing solutions to achieve envelopes' adaptability, are solved by materials that provide insulation and technologies to warm the ambient temperature. Common solutions to face the low external temperatures and to achieve the interior thermal comfort consist of systems of heating air, by means of radiators; floor heating systems; convection heaters or air conditioning systems. Usually, these thermal devices are fixed to walls, or they are coupled in the ceilings or floors of the rooms, occupying large areas of space, in addition to the room destined to combustion for heat generation. Likewise, the use of this type of facilities increases the energy demand in the buildings. On the other hand, for the conservation of the internal thermal gains, the envelope is considered as a thermal barrier that must avoid the loss of heat through the insulation. This improves air tightness, reducing the necessary heating and thus contributing to a decrease in energy consumption. However, insulation materials act as a barrier between the exterior environment and interior spaces, reducing the quality of indoor air and decreasing occupant satisfaction. This suggests that, despite the requirement to maintain heat, infiltration of air through the enclosure is important to achieve indoor air quality.

In **temperate climates,** most of the existing solutions to achieve envelopes' adaptability are solved by combining opposite strategies depending on the time of year. In winter, in order to cope with moderately cold temperatures and lower solar radiation, strategies for capturing solar radiation and conserving heat in the interior will be adopted. During the summer, to cope with moderately warm temperatures and higher solar radiation, solar gains and extraction of the heat generated in the interior by cooling will be adopted. The current solutions to achieve thermal comfort in summer and winter are detailed in depth in Chapters 4 and 6 respectively. Regarding to humidity, the envelope must avoid the conflict between regulation of humidity levels and possible losses of heat during the cold months. In many cases, due to the hermeticism of the envelope, condensation problems may occur. Common solutions for regulating indoor humidity levels consist of air treatment and dehumidification technologies. These systems do not contribute to reduce energy demand in buildings, but increase it. In addition, they may generate noise problems that can decrease the satisfaction of the occupants.

This suggests, that despite the requirement to maintain heat, ventilation through the enclosure is important to achieve indoor air quality, as far as relative humidity levels are concerned. Furthermore, the high atmospheric humidity condition provides an opportunity for the design of envelopes that function as water collectors. The temperate climate is characterized by abundant rainfall distributed throughout the year and a humid atmosphere. Due to this, the possible development of strategies of collection and storage of water through the envelope is valued, taking advantage of the great exposed surface that this supposes in the building.

In **warm climates,** most of the existing solutions to achieve the adaptability of the envelope are solved either by mechanical elements of sun protection or materials that provide insulation and technologies to cool the ambient temperature and thus dissipate excess heat. Common solutions for dealing with high solar radiation consist of shading systems to minimize heat build-up, maximize daylight and prevent glare. Such solar control systems may be adjustable mechanisms which generally do not track the exact solar radiation at each moment of the day. We may also include highly complex moving mechanisms for achieving kinetic shading and resulting in an adaptation achieved by means of electric power consuming devices. With regard to technologies that dissipate excess heat, most used devices for cooling are air conditioning systems, which do not contribute to reduce energy demand in buildings, but increase it. In addition, these systems are rarely integrated in the envelope from the initial design process, which generates an aesthetic appearance of attached elements both outside and inside the envelope.

Due to the disadvantages observed in the most commonly used systems in building envelopes, a new type of adaptability is suggested. Therefore, this research proposes the adaptability of the envelope to cold climatic conditions defined in a passive way through new biomimetic design challenges based on the abstraction of plant adaptations. Biological principles abstraction can improve innovation, and some design ideas are proposed, taking into account their challenges and possible benefits.

Q.7: *Is it possible to obtain greater adaptability in the construction of exterior building walls imitating Nature than following traditional processes?*

Through the analysis of existing solutions commonly used to achieve the adaptability in the envelopes, some disadvantages are observed. Due to this, a new type of envelope adaptability to the different climatic conditions is suggested in a passive way through, new biomimetic design challenges based on the abstraction of plant adaptations. Three design cases are presented in Chapters 4, 5 and 6 to demonstrate, in a theoretical and conceptual way, that it is possible to obtain a greater adaptability in the construction of exterior walls of buildings imitating Nature than following conventional processes. Thus, for each type of climate, the following passive control solutions are proposed, which could contribute to reduce the energy consumption inside the building:

· For cold climates:a reactive system that allows ventilation to achieve quality of indoor air, minimizing heat losses; in addition to some reactive strategies for capturing solar radiation and keeping the generated heat.

· For temperate climates: a reactive mechanism to regulate humidity levels of indoor; as well as an external water collector system.

· For warm climates: a reactive ventilation mechanism, as a night cooling process; as well as some reactive strategies for the protection of solar radiation.

However, the design cases presented only provide solutions from a theoretical or conceptual point of view. By not having performed an evaluation on a real built system, it is not possible to quantify the performance nor to evaluate the innovation contributed. Section 7.3 discusses the testing of these designs as a possible future development of this research.

Q.8: *How do we determine the feasibility of creating an architectural envelope that reacts to different external stimuli and regulates the comfort needs of the interior as if it were a living organism?*

The feasibility of creating an architectural envelope that reacts to different external stimuli and regulates the comfort needs of the interior as if it were a living organism, will be given by the amortization of research and its development. This will require real measurements on the behaviour and energy performance of the proposed designs. It will also have to estimate the manufacturing processes for its implementation, such as the state of development and availability of the expected reactive materials. Although the evaluation of all these issues is a challenge, this thesis establishes the basis for their response in the future.

7.2 Discussion

7.2.1 Main research contributions

The main research contributions of this thesis, compared to other research works on biomimetic architectural envelopes carried out so far, can be summarized in the following points:

. This research is only based on the leaves of the plants and their strategies of adaptation to different climates. The plants, due to their immobility as individuals, are an excellent biological material to detect climatic phenomena. Animals, unlike plants, can hide or seek protection from the elements, and because of this, they are rejected as a source of inspiration in this research. The relationship between plants and buildings is sought, through this lack of movement and permanence to a specific location, which implies exposure to environmental changes and resistance to climatic conditions that affect them at all times. However, plants, unlike buildings, have been able to adapt to the environment through evolutionary processes over millions of years. Therefore, adaptation strategies developed only by plants to their environment in different climatic areas have been studied. These adaptations are the key point of this work and it is what makes it different from other similar studies. Other research works have also focused on plants for potential transfers to architectural terms (see Chapter 2, section 2.6.3). However, these projects approach the study of plants from a type of morphological adaptation, according to orientation or geometric and distribution parameters, and not taking as priority the adaptation to the climate, which is the key of this thesis and what makes the difference with the rest of research works.

. Methodology “From plants to architecture” provides a novel classification to organize the different examples of adaptation considered of interest in different climatic areas. As previously explained, answering question 5, the proposed classification arranges the structural systems for adaptation of the plant leaves to their environment according to dynamic mechanisms and static strategies, depending on each environmental parameter (temperature, humidity, light or carbon dioxide). This classification has been made with the aim of facilitating the transfer of knowledge from the inspiration in the plants to the development of new architectural solutions. Also, as part of the developed methodology, its purpose is to serve as a useful tool for engineers and architects who wish to develop solutions of envelopes based on the strategies and mechanisms of adaptation of plants, selected by their potential.

7.2.2 Limitations and challenges

This research provides a selection of adaptation mechanisms and strategies explored on the leaves of plants in different European climatic zones. The most representative adaptations and biological examples of each zone have been chosen. However, in order to collect in a reliable database, the vast index of organisms provided by Nature, including detailed physiological analyzes, further research would be necessary in close collaboration with biologists.

It could also be considered a limitation that three design cases developed only provide solutions from a theoretical or conceptual point of view, proposing the viability of their implementation through too novel innovative technologies and even without assessing their economic cost.

Research initiated on the study of stomatal patterns is finally valued as a challenge to be developed in future projects. Some potential in stomatal patterns has been observed as a tool to create innovative patterns for building envelopes, through the proportion of opacity and transparency in their surface. However, despite the fact that the process of exploring the stomatal patterns of the most representative plants of each climatic zone (see “Stomata as static strategies” in Chapters 4, 5 and 6), any satisfactory results for the generation of patterns for architectural envelopes have not been achieved.

7.3 Future work

Taking into account the objectives suggested in this thesis, as well as the conclusions achieved, possible future developments are exposed below. Future developments derive from the work carried out in this line of research, about design and technical implementation of architectural envelopes according to biomimetic criteria:

· **Evaluation of performance of design cases proposed:** although the purpose of this work is not to create a design standard, but to create knowledge of adaptive solutions of Nature, it is considered as possible future development to deepen the evaluation of performance of design cases proposed in Chapters 4, 5 and 6.

- **To delve into adaptive design:** given the potential observed in stomatal patterning as a tool to create innovative patterns for building envelopes, through the proportion of opacity and transparency on their surface. Therefore, it is considered as a possible future development to continue the exploration of the stomatal patterning with the objective of extracting parameters to apply to the adaptive design of envelopes. Thus, in addition to adaptive behaviour, the envelope will reach the adaptability through patterns defined as strategic criteria in the formal design decisions.

- **To develop technical implementation:** this phase includes the development of conceptual designs in technical solutions through the application of advanced technologies. The following works are considered as future research developments:

  - To update and complete the search for active materials.

  - To create a hybrid system that incorporate multiple functionalities, with the aim to control, through a single mechanism, several environmental parameters simultaneously.

  - To carry prototypes out, as well as the manufacturing scale elements.

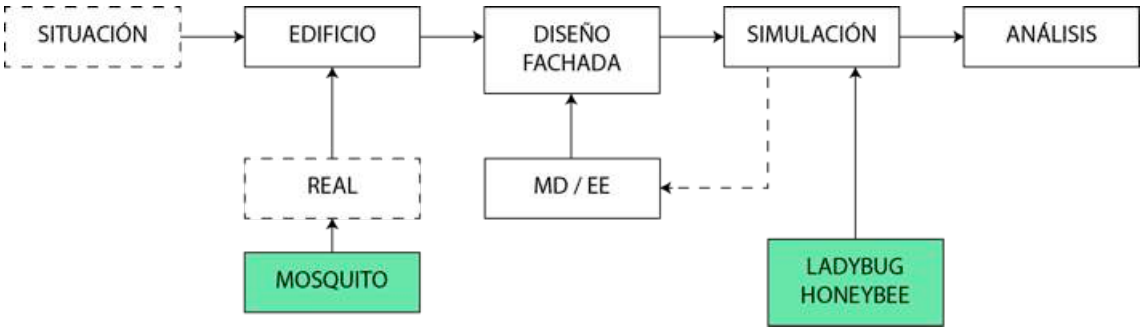
  - To evaluate the system, under real environmental conditions, in addition to the results achieved, using measurement techniques already established in the industry.

Anexo

Anexo: Estudio térmico

Este anexo pretende ser una introducción a la validación del diseño conceptual desarrollado en la tesis. No se trata de un estudio completo al salirse del ámbito de la tesis, pero sí una línea a desarrollar en el futuro.

Realizaremos el estudio térmico en cinco etapas: Situación (y por tanto selección climática), Edificio, Fachada, Simulación y Análisis.

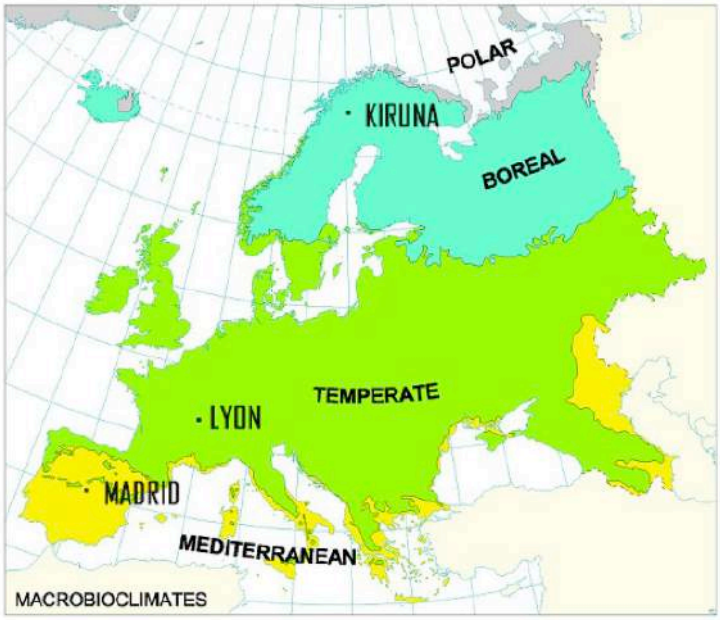


Para la realización de todo este proceso, se utilizará el plugin Grasshopper del software de modelado 3D Rhinoceros. Además se utilizarán los plugins adicionales, Mosquito, Ladybug y Honeybee que permitirán la realización de la simulación térmica. En el apartado XX se explica con más detalle el funcionamiento de cada uno.

Metodología

Situación

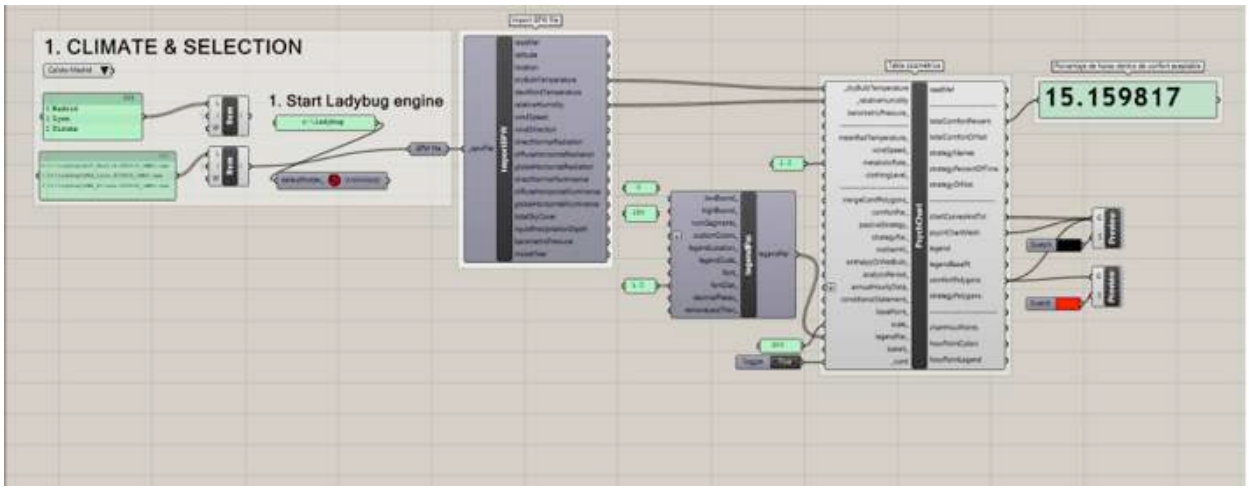
En este anexo mostramos una introducción al estudio de los climas estudiados en la tesis que sirva como guía a futuros desarrollos. Se ha elegido por ello la ciudad de Madrid (España-cálido), Lyon (Francia – templado) y Kiruna (Suecia – frío).



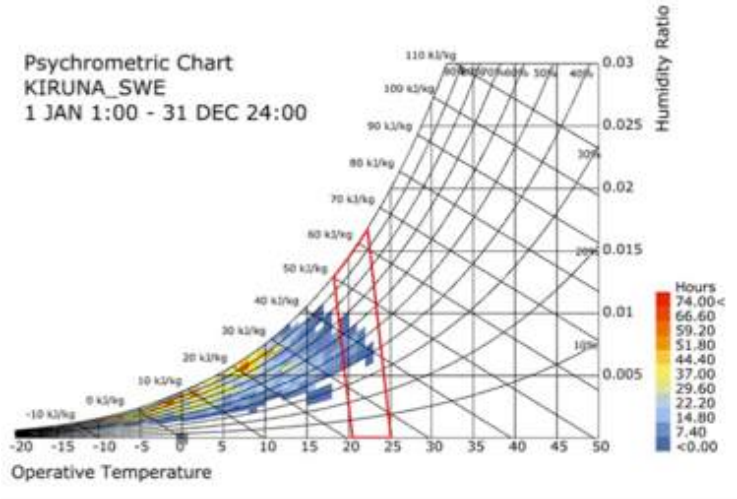
Una vez elegida la ubicación, se cargará el archivo con información climática correspondiente. En este estudio se utilizará el estándar EPW (EnergyPlusWeather Format) basado en normativa ASHRAE en el cálculo de sus parámetros.

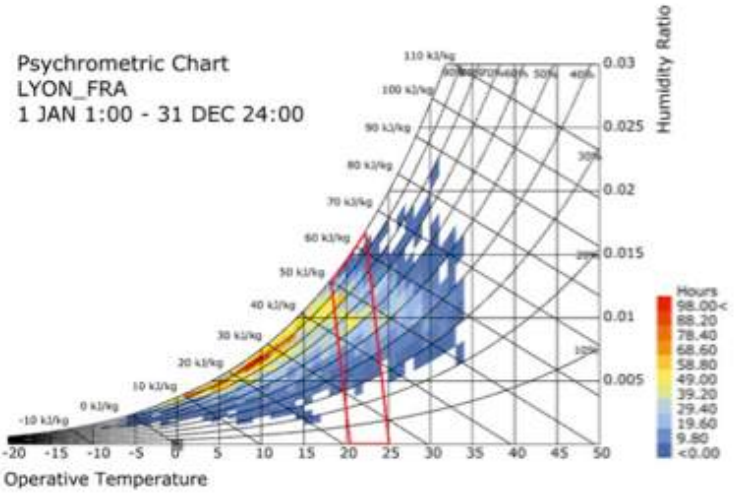
Ver más información sobre el archivo EPW: https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/EngineeringReference/05-Climate/index.html

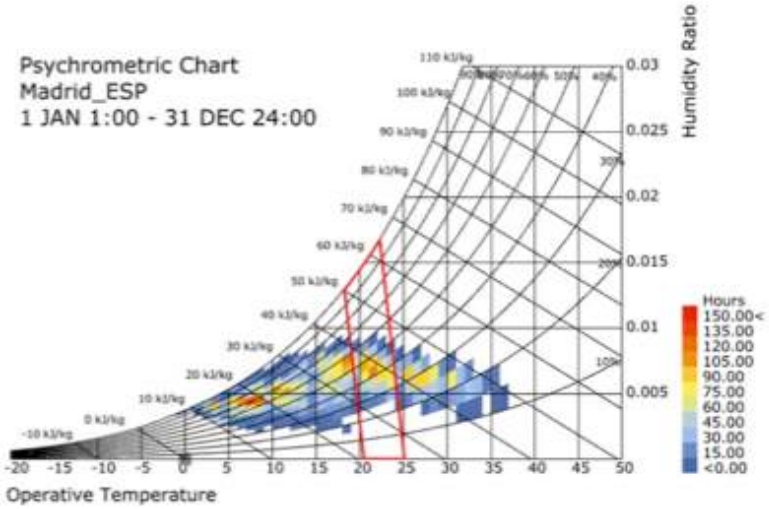
La lectura de la información de ese archivo se realiza con una primera definición en Grasshopper.



Esta definición nos devuelve en las vistas de Rhinoceros las gráficas de temperatura y las cartas sicométricas de la ciudad.


Psychrometric Chart
KIRUNA_SWE
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00
Humidity Ratio
Hours
74.00<
66.60
59.20
51.80
44.40
37.00
29.60
22.20
14.80
7.40
<0.00
Operative Temperature

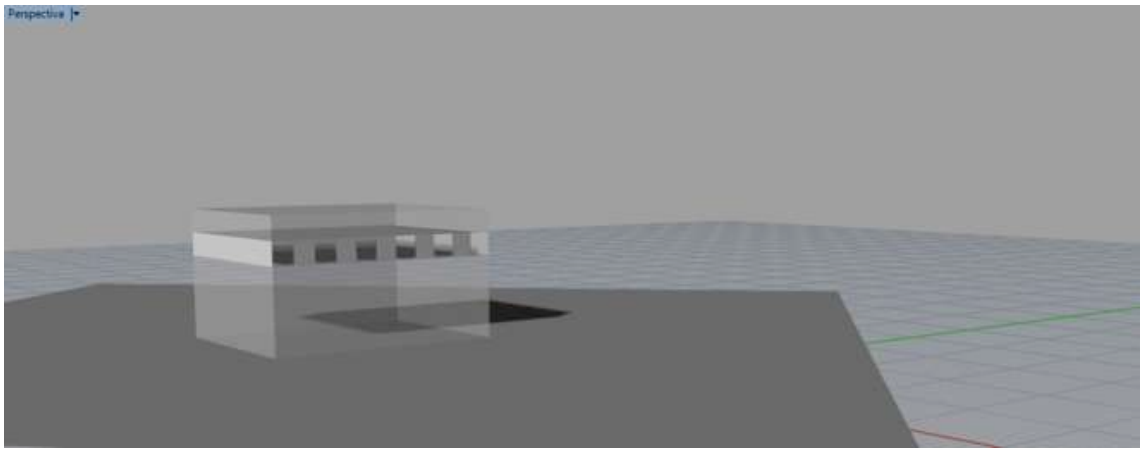

Psychrometric Chart
LYON_FRA
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00
Humidity Ratio
Hours
98.00<
88.20
78.40
68.60
58.80
49.00
39.20
29.40
19.60
9.80
<0.00
Operative Temperature


Psychrometric Chart
Madrid_ESP
1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00
Humidity Ratio
Hours
150.00<
135.00
120.00
105.00
90.00
75.00
60.00
45.00
30.00
15.00
<0.00
Operative Temperature

Edificio

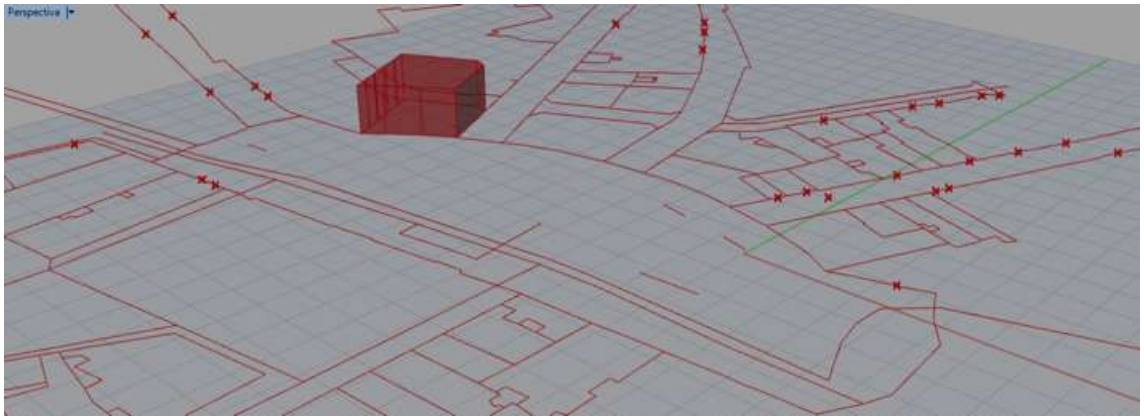
Se realiza un algoritmo en Grasshopper que permite el modelado del edificio.

El estudio con dos modelos de edificios: en primer lugar un edificio genérico que permitirá la comparación entre los tres climas. Se trata de un edificio simple, con forma prismática de medidas 20 x 25 x 45 metros, con un bajo de 4 m de altura y altura de los pisos de 2,5 m. Se elige como piso para la simulación el segundo piso. Se permitirá la definición del número de plantas, dimensiones de la planta, fachada sobre la que se trabaja y número de ventanas.



También se realiza la simulación con un edificio real del emplazamiento, lo que permitirá la comparación entre los dos modelos (edificio clásico vs. edificio biomimético) para cada uno de los climas. En esta ocasión no se debe hacer la comparación entre los climas puesto que las geometrías son diferentes.

En la imagen vemos la selección del edificio en Madrid (plaza del Sol).

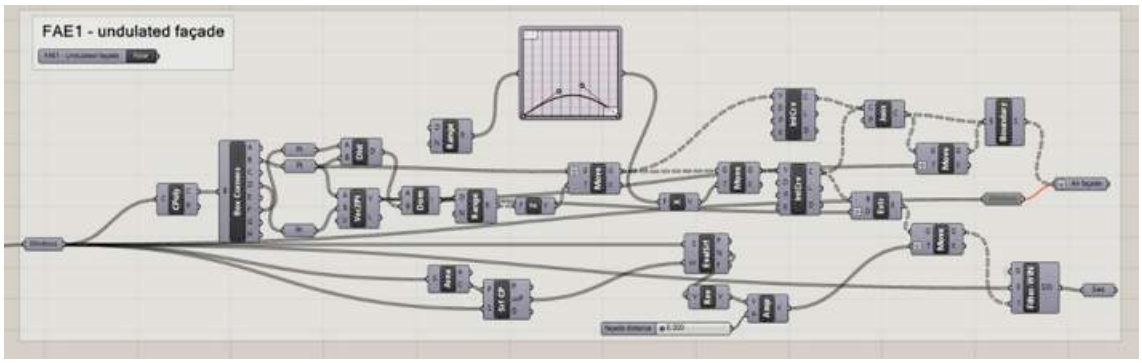


Esta etapa finaliza con la selección de la planta sobre la que se realiza la simulación.

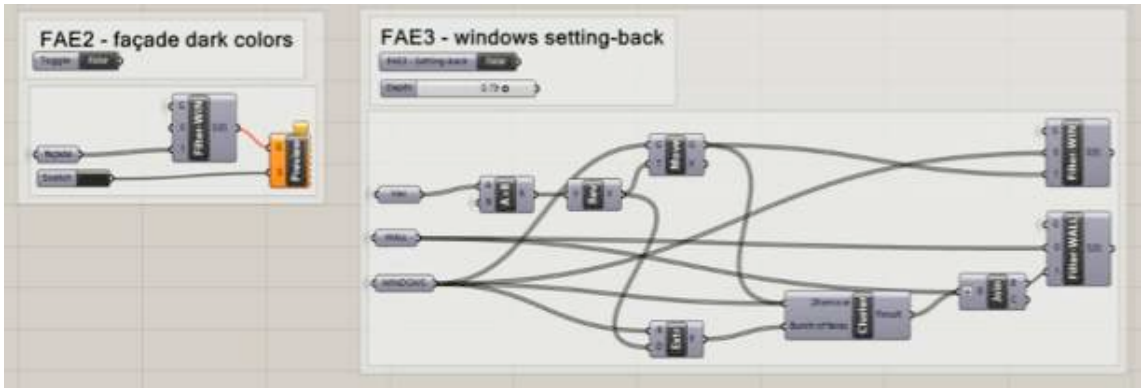
Fachada

Una vez seleccionado el edificio y la planta sobre la que se realizará la simulación, se crea una fachada y, en función del clima seleccionado, también se abre la posibilidad de modificar la estructura del edificio.

Por ejemplo, en el estudio del clima cálido se han programado los siguientes mecanismos y estrategias:

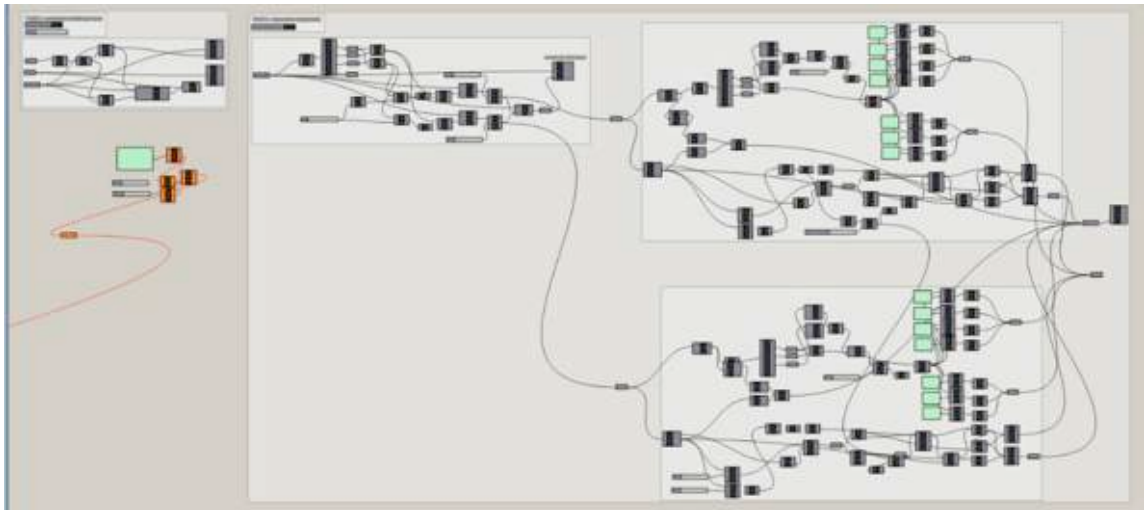


FAE1: Crecimiento en forma de cojinete esférico para mantener una temperatura y un microclima interior más fresco.



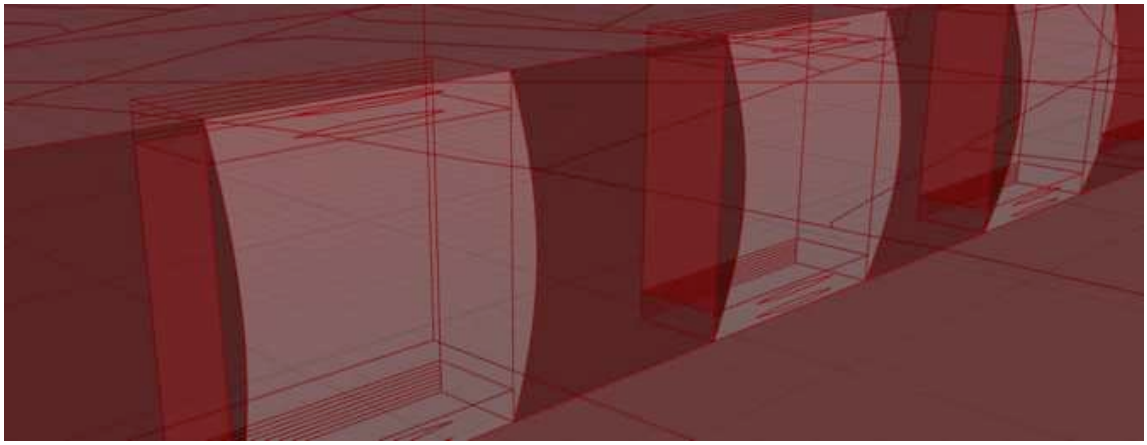
FAE2: Pubescencia foliar para disminuir el calentamiento y reflejar la radiación ultravioleta. Ceras para reflejar la radiación.

FAE3: Estomas protegidos en concavidades para no recibir los rayos solares directamente y permanecer en la sombra



FAD1: Apertura estomática para enfriamiento por evaporación.

La aplicación de todos los mecanismos y estrategias generarán un nuevo modelo de planta que se simulará térmicamente.



Simulación

La comparativa se realizará evaluando el confort interior del piso. La evaluación del confort en ambientes térmicos moderados se rige por la norma UNE-EN ISO 7730:2006 titulada "Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local". La norma presenta métodos para la predicción de la sensación térmica general y del grado de incomodidad que tienen las personas.

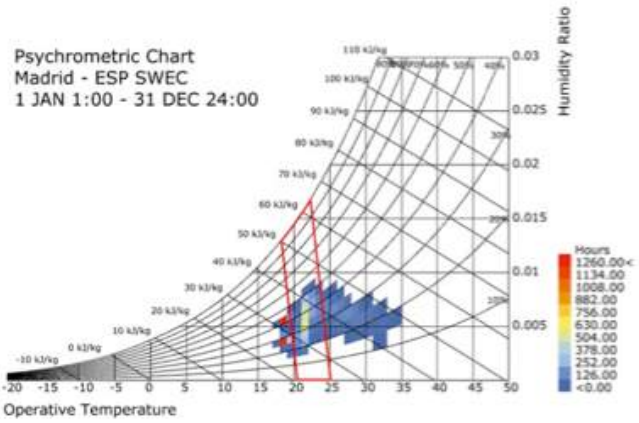
La determinación analítica y la interpretación del bienestar térmico, se realiza mediante el cálculo de índices como el PMV que también recoge la norma ANSI/ASHRAE Standard 55. El índice PMV (Predicted Mean Vote) indica el valor medio de los votos emitidos por un grupo de personas respecto a una escala de sensación térmica de siete niveles. Los niveles son: muy caluroso (+3), caluroso (+2), ligeramente caluroso (+1), neutro (0), ligeramente fresco (-1), fresco (-2) y frío (-3). En el cálculo del índice intervienen diferentes factores como: el aislamiento, factor de superficie y temperatura de la ropa, la tasa metabólica de la persona, la temperatura y la velocidad del aire, entre otros factores. En esta simulación tendremos en cuenta tan sólo la tasa metabólica que igualaremos a 1,2; lo que indica una situación de paseo o caminar tranquilo.

Los plugins de Grasshopper permiten la generación de cartas psicométricas basadas en el índice PMV y que nos servirán de comparación.

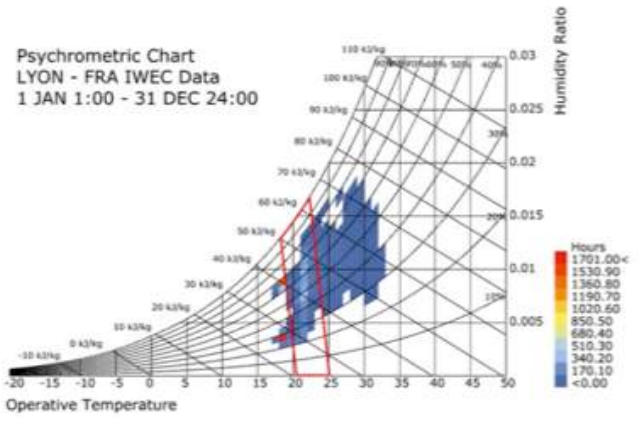
La simulación deberá llevar a cambios en el modelado del edificio cuando se busque una optimización del confort.

Resultados

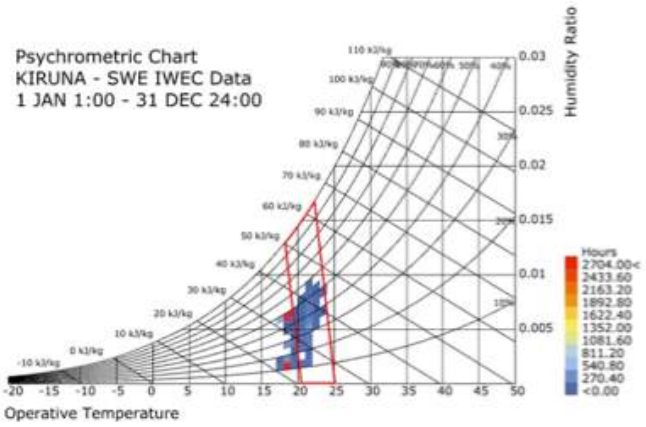
En el caso de la planta sin ninguna fachada modificada, obtenemos las siguientes cartas psicométricas.



Madrid – clima cálido



Lyon – clima templado



Kiruna – clima frío

Con unos porcentajes de confort interno de 49,12% en Madrid; 42,24 % en Lyon y de 21,8% en Kiruna.

Se estudiará el efecto de la aplicación de estrategias y mecanismos frente a un estado sin su aplicación.

Análisis

Se realiza a continuación un análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

Sofware

Para hacer la simulación se ha utilizado un programa de modelado 3D, Rhinoceros. Sobre él se ha ejecutado un editor gráfico, Grasshopper, que ha permitido el modelado y parametrización del edificio. Para realizar la simulación térmica, se han instalado dos plugins sobre Grasshopper: Ladybug y Honeybee, así como Mosquito, que permitió la generación de edificios reales.

GRASSHOPPER

Grasshopper es un editor gráfico de algoritmos integrado en el software de modelado 3d Rhinoceros. Permite de una forma sencilla la creación de geometrías paramétricas y se pueden programar nuevos plugins que complementen a los componentes de forma que se extiendan sus capacidades.

Se puede descargar gratuitamente en http://www.grasshopper3d.com/

MOSQUITO

Mosquito es un plugin que permite entre otras aplicaciones obtener mapas vectoriales a partir de una localización concreta.

Permitirá obtener la geometría del edificio real sobre la que realizar la simulación.

Desarrollado por Carson Smuts se puede descargar gratuitamente en http://www.studiosmuts.com/ceed3/mosquito/

LADYBUG

Ladybug es un plugin libre y de código abierto para Grasshopper que se utiliza para ayudar a los diseñadores y arquitectos a crear diseños y arquitecturas teniendo en cuenta al medioambiente.

Ladybug importa el estándar climático EnergyPlus (archivos .EPW) y ofrece al diseñador una variedad de gráficos relacionados con la radiación y horas solares por ejemplo, que permiten tomar decisiones durante la fase conceptual del proceso de diseño. Su integración con el modelado paramétrico generado en Grasshopper permite la modificación interactiva de estos modelos.

Se puede descargar gratuitamente en http://www.grasshopper3d.com/group/ladybug

HONEYBEE

Honeybee conecta Grasshopper con EnergyPlus, Daysim y OpenStudio para generar simulaciones de iluminación y energía en edificios. HoneyBee ofrece las características de estos programas en un formato paramétrico.

• EnergyPlus: Motor de cálculo. Es un programa de simulación térmica y energética de edificios. Más información en: https://energyplus.net

• Daysim: Regulación de la radiación solar y la iluminación natural. Es un software de análisis de luz solar basado en radiación que modela la cantidad de luz solar incidente en el edificio y alrededores. Más información en: http://daysim.ning.com

• Openstudio: Análisis energético de los edificios. Colección de herramientas de software de ayuda y asistencia al modelado energético del edificio completo utilizando el cálculo EnergyPlus y Radiance. Incluye la visualización y edición de horarios, edición de cargas, soluciones constructivas y materiales. Más información en: https://www.openstudio.net