



DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría Y Doctorado en Diseño

**LA ARQUITECTURA ANIMAL Y SUS SISTEMAS DE
CLIMATIZACIÓN PASIVA COMO ALTERNATIVA
EN EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO**

Jaime Dávila Arribas

Tesis para optar por el Grado de Maestro en Diseño
Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

Miembros del Jurado:

Mtra. Gloria Castorena Espinosa
Directora de la Tesis

Sinodales

Dr. Víctor Fuentes Freixanet

Dr. Aníbal Figueroa Castrejón

Dr. Rodrigo Ramírez Ramírez

Mtro. Manuel D. Gordon Sánchez

México D.F.
Abril de 2015

Índice:

1.- Resumen.				p. 1
2.- Introducción.				
2.1.- Antecedentes, biónica, biomimesis y arquitectura vernácula.				p. 2
2.2.- Planteamiento y delimitación del problema.				p. 8
2.3.- Justificación.				p. 9
2.4.- Objetivos.				p. 9
2.5.- Hipótesis.				p. 10
3.- Marco teórico.				
3.1.- Estado del arte – construcciones animales.				p. 10
3.2.- Definición de conceptos.				p. 14
4.- Metodología desarrollada.				p. 18
5.- Muestra de estudio de construcciones animales, clasificación por estrategia bioclimática.				p. 23
5.1.- Orientación:	Termitas	–	<i>Amitermes meridionalis.</i>	p. 26
5.2.- Ventilación:	Termitas	–	<i>Macrotermes michaelseni</i>	p. 37
	Hormigas	–	<i>Atta laevigata y vollenweideri</i>	p. 51
5.3.- Termorregulación:	Abejas	–	<i>Apis mellifera y meliponini</i>	p. 62
	Avispas	–	<i>Polistinae y Vespinae</i>	p. 75
6.- Estrategias de climatización pasiva encontradas en la muestra de estudio. Fichas sintéticas y estrategias similares en la arquitectura.				
6.1.- Orientación:	Termitas	–	<i>Amitermes meridionalis.</i>	p. 85
6.2.- Ventilación:	Termitas	–	<i>Macrotermes michaelseni</i>	p. 87
	Hormigas	–	<i>Atta laevigata y vollenweideri</i>	p. 88
6.3.- Termorregulación:	Abejas	–	<i>Apis mellifera y meliponini</i>	p. 90
	Avispas	–	<i>Polistinae y Vespinae</i>	p. 91
7.- Modelización de estrategias de los casos de estudio.				
7.1.- Ubicación de las construcciones animales en la matriz de estrategias de climatización pasiva en función de los mecanismos de transferencia de calor.				p. 93

7.2.- Diagramas sintéticos de estrategias por caso de estudio.	p. 96
7.3.- Análisis climático.	p. 98
8.- Diseño conceptual de una aplicación con base en los componentes bioclimáticos seleccionados de la muestra de estudio.	
8.1.- Muros gaviones como sistema de envolvente porosa.	p. 101
8.2.- Posibilidades, modificaciones y adecuaciones a muros gaviones para alcanzar los mecanismos seleccionados.	p. 103
9.- Evaluación del desempeño bioclimático de la aplicación.	
9.1.- Diseño de la evaluación.	p. 112
9.2.- Análisis de porosidad, densidad y absorción.	
I. Porosidad.	p. 115
II. Densidad.	p. 119
III. Absorción.	p. 121
9.3.- Análisis de ventilación, velocidad, volumen y dirección.	
I. Velocidad.	p. 123
II. Volumen.	p. 135
III. Dirección.	p. 138
9.4.- Análisis térmico – Basalto, Gavión y Gavión + ventilación forzada.	
9.41.- 1er análisis material base – Basalto.	p. 147
9.42.- 2do análisis – Gavión.	p. 152
9.43.- 3er análisis – Gavión + Ventilación forzada.	p. 156
10.- Conclusiones.	
10.1.- Conclusiones.	p. 165
10.2.- Recomendaciones de diseño.	p. 169
10.3.- Género de edificios donde pueden aplicarse gaviones	p. 170
11.- Anexos.	
Anexo 1.- Reproducción de medidor de flujo de calor de formato pequeño (20X20cm).	p. 175
Anexo 2.- Manual de operación para el medidor de flujo de calor de pequeña escala.	p. 195
Anexo 3.- Formatos desglosados de análisis térmico para muestras de tablaroca y basalto.	p. 200
Anexo 4.- Formatos desglosados de análisis térmico para muestras de gaviones.	p. 202
12.- Índice de figuras, tablas y ecuaciones.	p. 203
13.- Fuentes.	p. 211
14.- Curriculum Vitae	p. 216

1.- Resumen.

El objetivo de este trabajo es ampliar las fuentes de información que utiliza el diseño bioclimático para proponer sistemas pasivos, basadas en el conocimiento contenido en sistemas naturales como las construcciones y habitáculos animales en cuanto a sus sistemas de climatización para su posterior aplicación.

Así como la arquitectura vernácula o tradicional es una valiosa fuente de información en cuanto a sus estrategias de climatización basadas en el aprovechamiento de las energías y recursos del sitio, en el uso de materiales locales, técnicas de construcción y formas de habitar; la arquitectura animal puede aportar una serie de estrategias y mecanismos posibles de aplicar a sistemas de climatización de bajo impacto ambiental en construcciones humanas.

A partir de la investigación e interpretación de cinco casos de estudio de arquitectura animal, se determinaron algunas estrategias bioclimáticas basadas en tres ejes de análisis, la orientación, la ventilación y la regulación térmica. Cómo muestra de acervo de información al servicio del diseño pasivo, se generaron fichas sintéticas de los mecanismos bioclimáticos encontrados y se hace una comparación con algunas estrategias similares utilizadas en la arquitectura vernácula o contemporánea.

Para ejemplificar la aplicación del conocimiento extraído en estos sistemas naturales, se propone a modo de herramienta de reinterpretación, un análisis comparativo de los mecanismos detrás de las estrategias de climatización y también un breve análisis climático. Con base en esto se presenta el diseño conceptual de una envolvente arquitectónica porosa a partir de un sistema constructivo existente como son los muros gaviones, con cualidades de retardo térmico, ventilación y enfriamiento evaporativo directo útil de aplicarse en climas cálido-secos.

Por último se presenta la evaluación experimental del desempeño de la envolvente propuesta para alcanzar los mecanismos seleccionados, para esto, se determinó primeramente el porcentaje de porosidad, densidad y absorción de la muestra. Segundo un análisis de la tasa de ventilación donde se indica la velocidad, volumen y trayectoria del viento que atraviesa la envolvente propuesta. Por último se realizó una evaluación térmica donde se determinó la conductividad y capacidad de retardo térmico de la muestra de estudio.

Con base en los resultados obtenidos se sugiere a otros diseñadores utilizar los mecanismos aquí determinados para proponer otras aplicaciones y continuar con la generación de conocimiento basado en sistemas naturales ya que presenta amplias áreas de oportunidad. Por último continuar con evaluaciones a las envolventes porosas ya que presentan un reto complejo difícilmente satisfecho en los tiempos con los que se cuenta para esta investigación.

2.- Introducción.

2.1.- Antecedentes, biónica, biomimesis y arquitectura vernácula.

Afirma Fabricio Vanden Broeck, que el medio ambiente se ha interpretado como un ente pasivo, como un almacén de materias primas a nuestra disposición, donde en el mejor de los casos se reconoce la urgencia de abastecerse de ella de manera más consciente. En contraste el medio ambiente puede considerarse como el repositorio de el recurso más importante, el conocimiento, perfeccionado durante millones de años (Vanden Broeck, 2000).

A mediados del siglo XX, aparece la biónica, con la intención de proponer soluciones a problemas humanos basados en analogías biológicas. Problemas tales como: Estructura, locomoción, coordinación, transmisión de información, etc.

La estructura de los huesos es uno de los temas recurrentes en la biónica, dado su posible aplicación en estructuras ligeras en la construcción. A pesar de que en las uniones de los huesos se maximiza la superficie de apoyo y articulación, el material poroso que contiene en las extremidades disminuye el uso excesivo de este.

Según Fabricio Vanden Broeck la biónica se define como *“El estudio de los sistemas y organizaciones naturales, con miras a analizar y recuperar soluciones funcionales, estructurales y formales para aplicarlas a la resolución de problemas humanos, a través de la creación de tecnología y la concepción de objetos y sistemas de objetos”* (Vanden Broeck, 2000).

Uno de los objetivos de la biónica consiste en crear un banco de datos que alimente al diseño, sin necesariamente producir aplicaciones inmediatas. Algunos de los conceptos estudiados por la biónica:

Forma: Esta determinada por el equilibrio de fuerzas dinámicas, internas y externas.

Esfera y espiral: La esfera es por sus características geométricas la forma idónea de protección, contiene el máximo de volumen por unidad de superficie. La espiral sucede a la esfera como patrón de crecimiento, es la expresión vertical de la esfera. Las disposición de las hojas en el tallo siguen un patrón helicoidal, permite una mínima obstrucción para recibir los rayos del sol. Las hojas de la parte inferior al tener mas tiempo para desarrollarse son mas grandes, las de la parte superior ya que son jóvenes son pequeñas y no obstruyen la luz.



Figura 2.1: Filotaxis se le denomina al acomodo que presentan las hojas en el tallo, opuestas, alternas, verticiladas, etc. Izquierda: *Linaria triornithophora*, disposición verticilada de las flores. Fuente: fotonatura.org Derecha: Escalera helicoidal, pirámide del Louvre, I. M. Pei. Fuente: wikimedia.org.

Apilamiento compacto: Economía de espacio promovida por la acción de fuerzas externas (gravedad, compresión). Por ejemplo, el acomodo de piedras cuatrapeado (a tresbolillo) o el panal de abejas. Tiende a eliminar los intersticios caracterizada con uniones triples (Vanden Broeck, 2000).

Olgay indica que en la naturaleza solo sobreviven las especies que se encuentra en equilibrio con su entorno, con los materiales y adaptadas a las fuerzas que las rodean. Menciona sobre la formas que adopta la naturaleza son moldeadas por las fuerzas internas y externas que las rodean. Entendiendo estas fuerzas se conocerá mejor las formas y viceversa. La arquitectura vegetal es también una fuente de información para entender las fuerzas externas de las que habla Olgay. *Las secciones de las hojas muestran el efecto del entorno en la morfología de las plantas* (Olgay, 2010).

La biomimesis o biomimicry es una disciplina relativamente reciente que tiene como objetivo el tomar como fuente de inspiración e información a la naturaleza para resolver problemas humanos. En su forma más práctica la biomimesis es una forma de búsqueda de soluciones sustentables utilizando las estrategias (principios, patrones y funciones) de los ecosistemas.

Algunos de los principios de esta disciplina resultan muy cercanos a las estrategias pasivas propuestas por la bioclimática (Sitio de Biomimicry 3.8, 2013).

- **Buen desempeño:** En la naturaleza lo que no funciona adecuadamente, desaparece. Por más de 3.8 millones de años el sistema ha probado continuamente sus estrategias y patrones. Los sobrevivientes de este ensayo y error son parte de un gran acervo de conocimientos.

- Ahorro de energía: El ahorro de energía en el mundo natural es asunto de vida o muerte. Quien gasta más energía de la que puede, perece. De ahí la existencia de los patrones y sistemas de extrema eficiencia energética.
- Sin desperdicios: En la naturaleza no hay desperdicios, todo forma parte del sistema en forma de transiciones y nutrientes del hábitat o hábitats.

Metodologías propuestas.

Para Fabricio Vanden Broeck las analogías entre naturaleza y técnica presentan problemáticas que limitan la metodología. En principio la principal proviene del conocimiento del mundo natural a través de la ciencia, es decir esta limitado por el desarrollo de la ciencia y la técnica. Otra es que los sistemas naturales son dinámicos en cuanto al espacio y también al tiempo (Vanden Broeck, 2000).

Las disciplinas emergentes como la biónica y la biomimesis proponen un acercamiento multidisciplinario, pretenden juntar dos disciplinas usualmente desligadas, en este caso, el diseño y las ciencias naturales.

El objeto natural parte de la modificación y de las estructuras preexistentes para producir nuevos sistemas. Nunca son productos terminados, sino una secuencia de etapas en proceso. El objeto natural es una sinergia de funciones, donde todo trabaja para todo y difícilmente puede reducirse a partes. Esta poli funcionalidad es uno de los mayores retos al diseño que pretende emular usualmente funciones aisladas (Vanden Broeck, 2000).

I. Metodología propuesta desde la biónica (Vanden Broeck, 2000):

- Efectuar una primera lectura desde la perspectiva del diseño.
- Confrontar los datos adquiridos con los de otras disciplinas (ciencias).
- Modelizar creativamente las funciones encontradas con base en las herramientas técnicas existentes, sirve como catalizador de aplicaciones aparentemente poco evidentes.

Resulta útil plantearse el objeto de estudio como un artefacto llegado de otro planeta y de ahí tratar de descifrar de forma abstracta (Vanden Broeck, 2000):

- Características funcionales
- Materiales
- Como se fabricó
- Es posible utilizar al objeto de estudio como un pretexto para especular y experimentar.

Según Vanden Broeck, Ken Yeang propone en su obra, *The use of biological analogies for design*, la siguiente metodología (Vanden Broeck, 2000):

- Selección del sistema biológico de estudio con base en que sus atributos sean análogos a los del sistema que se desea diseñar.
- Determinación de los criterios que permitan evaluar y cuantificar la validez de la analogía.
- Observación experimental y abstracción del sistema biológico investigado (considerado como prototipo).
- Traducción a un lenguaje técnico a través de la modelización.
- Interpretación del modelo y adecuación del principio detectado al sistema por diseñar.
- Proceso de evaluación del funcionamiento del sistema diseñado y retroalimentación.

II. Metodología de la biomimesis (Biomimicry 3.8 Institute, junio 2013):

Según la biomimesis aporta un valor agregado al proceso de diseño mediante una estructura de cuatro pasos. Alcances, descubrimientos, creaciones y evaluaciones.

a) Alcances.

- Definir el contexto: Delimitar el objetivo y sus condiciones de operación .
- Identificar las funciones: Determinar que funciones clave debe de cumplir el diseño (termorregulación, reproducción, crecimiento, mantener la integridad estructural, uso de energía, etc).
- Integrar los “principios de vida”: Compromiso de incorporarlos a los requerimientos del diseño (adaptarse a condiciones cambiantes, estar localmente adaptados, utilizar química amigable con el medio, eficiencia de recursos, evolucionar para sobrevivir, entre otros).

b) Descubrimientos.

- Descubrir modelos naturales: Encontrar organismos o ecosistemas que han perfeccionado estrategias para cumplir con la función buscada.
- Abstraer estrategias biológicas: Determinar el mecanismo detrás de la estrategia de cada organismo o ecosistema (principio biológico) y traducirla en un principio de diseño abstracto (libre de referencias a la biología).

c) Creaciones.

- Lluvia de ideas bio-inspiradas: Desarrollar múltiples ideas de como aplicar los principios de diseño al objetivo buscado.
- Emular los principios de diseño: Afinar las mejores ideas y desarrollar un concepto de diseño. Considerar la escala, cuando ir de emular la forma a emular procesos y ecosistemas. (biomimesis superficial – biomimesis profunda)

d) Evaluaciones.

- Medir la eficacia del diseño: Utilizar los principios de vida como parámetro (estar en sintonía local, adaptarse al cambio, eficiencia de recursos, etc).

Estas metodologías son consistentes en proponer la modelización abstracta de las funciones o principios encontrados en los patrones naturales y un acercamiento multidisciplinar, en particular para diseñar criterios de evaluación de las propuestas producidas. En el caso de la biomimesis se propone utilizar los “principios de vida” como parámetro, aunque estos son más de carácter cualitativo que cuantitativo.

Por otro lado como menciona el fisiólogo Scott Turner, la biomimesis parte de la presunción general que la selección natural posee un poder perfeccionador de los sistemas y organismos, listos para ser aplicados para problemáticas humanas, sin necesariamente probar dicho proceso de perfeccionamiento en cada caso, por lo que la aproximación al tema debe ser crítico y fortalecer los criterios de evaluación.

Arquitectura vernácula.

Si consideramos que la arquitectura animal puede analizarse y reinterpretarse según criterios de la arquitectura bioclimática, habrá que decir que el estudio de la arquitectura vernácula como acervo de información para el diseño resulta con similitudes posibles de aprovechar.

El uso de sistemas naturales como inspiración en el diseño no es una tarea reciente, lo más probable es que las primeras construcciones de la humanidad hayan buscado en su entorno soluciones para destinarlas a resolver problemas humanos.

La arquitectura vernácula como acervo de conocimientos resulta útil en una variedad muy amplia de aspectos. Permite identificar dentro de una población una serie de características probadas por largo tiempo, en cuanto al uso de sistemas pasivos, materiales y recursos, organización espacial, sistemas constructivos, adaptación al clima, etc. posibles de ser reproducidas o reinterpretadas.

Los estudios de arquitectura bioclimática han puesto particular énfasis en mejorar la relación de los edificios y las construcciones humanas con el medio ambiente. Ha revalorizado las formas tradicionales de hacer y vivir la arquitectura y la ciudad. Esto debido a que estas formas vernáculas procuraban el bienestar de las personas con un bajo impacto ambiental, antes de la dependencia a los combustibles fósiles.

No solo se han revalorizado las estrategias pasivas de este tipo de soluciones, sino que de forma conjunta su expresión formal y estética en el diseño arquitectónico ha tenido un regreso notable como recurso proyectual.

Un buen ejemplo de lo anterior es la utilización de este tipo de esquemas por arquitectos de gran influencia en los círculos arquitectónicos, como la obra del arquitecto Renzo Piano en el centro cultural de Nueva Caledonia o incluso en obras de “vanguardia” como las de Norman Foster.

Para Norberg-Shulz la arquitectura primitiva ha sido fuente de inspiración para los diseñadores debido a sus formas cargadas de significados. En particular en épocas actuales donde es difícil reconocer estilos u ordenes visuales (Norberg-Schulz,1998)

Contrastan dos posiciones, la que considera que a partir del diagnóstico de un problema a resolver es posible deducir respuestas únicas y originales para esa situación en particular. Y la que piensa que la cultura y la historia han verificado la eficacia de una serie de soluciones que los dedicados al diseño deben considerar para ajustar a realidades nuevas (Olea y González Lobo,1988).

La historia de la arquitectura se ha centrado en la obra de autor, el arquitecto o diseñador de forma individual, en contraste la arquitectura vernácula es una creación colectiva y continua de los pueblos, que en particular muestran como dice Bernard Rudofsky un notable talento para ubicar sus edificios al medio natural (Rudofsky,1973) y por tanto una fuente de conocimiento posible de aprovechar.

Olgay encuentra en su observación de algunos asentamientos comunitarios un común denominador, características regionales claramente definidas que constituyen respuestas claras a las exigencias de los respectivos climas (Olgay, 2010).

Es muy posible que las arquitecturas tradicionales hayan tomado como fuente de inspiración las construcciones animales y vegetales. El ingenio y la técnica fueron desarrollando sus habilidades para construir refugios y posteriormente la arquitectura del mundo industrial ha aprovechado estos saberes desarrollados con anterioridad.

Las estrategias de diseño surgen en primera instancia de la imitación que hace el hombre del mundo que le rodea, así junta sus manos para atrapar un poco de agua y poderla beber, como el agua que se acumula en las hojas de las plantas.

Después las distintas disciplinas y las ciencias han podido ir descifrando el enorme acervo de conocimientos acumulados en las tipologías básicas como respuesta al entorno. Olgay reporta un estudio de Jean Dollfus donde según los resultados muestran que las tipologías constructivas responden más a las zonas climáticas que a las fronteras territoriales. La forma general de la vivienda nace de su respuesta al entorno (Olgay, 2010).

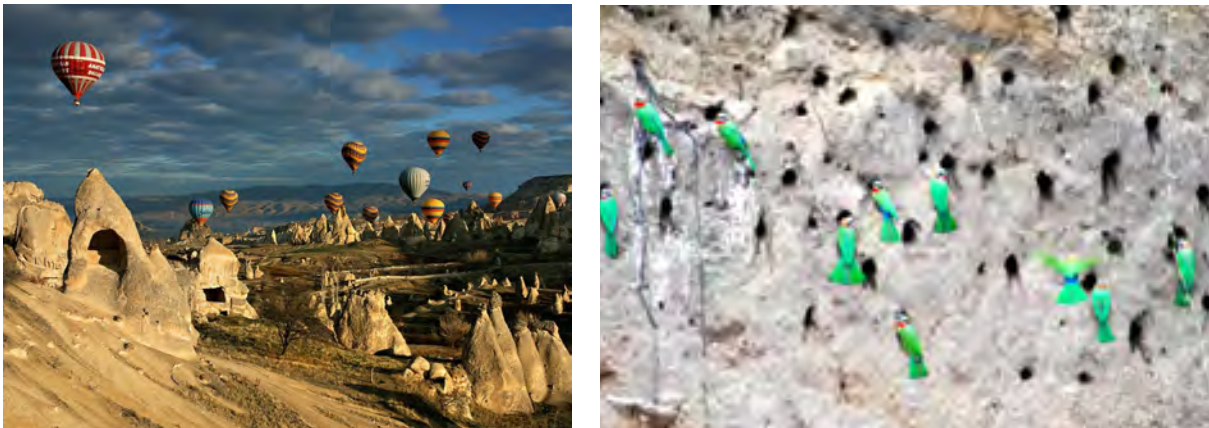


Figura 2.2: Arquitectura por sustracción. Izquierda: Viviendas trogloditas en Capadocia, Turquía, fuente: nationalgeographic.com. Derecha: Colonia de aves Merops bullockoides, Sudáfrica, fuente: The internet IBC bird collection.

2.2.- Planteamiento y delimitación del problema.

Según el FIDE en México aproximadamente el 30% del total del consumo de energía corresponde a los sectores residencial, comercial y de servicios. Se estima que en climas cálidos, cerca del 35% de esta energía es empleada para el acondicionamiento de las edificaciones. La CONAFOVI estima que los edificios consumen casi el 20% de la energía total del país, y de estos edificios poco más del 80% lo consumen viviendas (CONAFOVI, 2006).

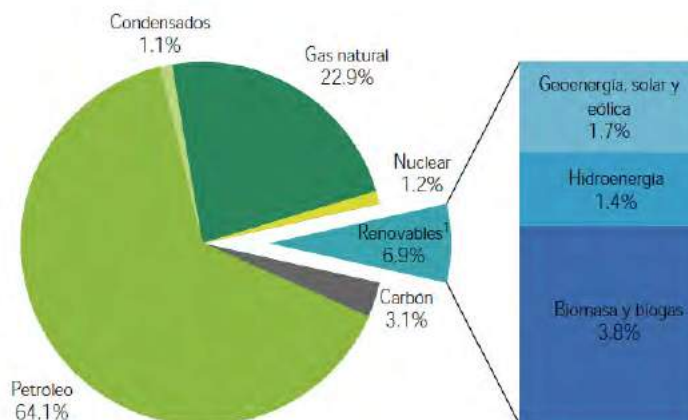


Figura 3.3: Estructura de la producción de energía primaria, 2011. Fuente: Balance nacional de energía 2011, SENER.

Según el balance de Nacional de energía en 2011, solo el 6.9% de la producción total de energía proviene de fuentes renovables. Además de que las reservas de combustibles fósiles son finitas, la preocupación de los modelos energéticos actuales radica en su impacto ambiental. Enfrentando esta realidad es necesario ampliar el conocimiento en el diseño de edificaciones que den prioridad al uso de estrategias de climatización pasivas o de bajo impacto ambiental.

Los estudios de arquitectura bioclimática han propuesto estrategias de climatización de bajo consumo de energía, muchas de ellas basadas en soluciones tradicionales de la arquitectura vernácula, otras producidas mediante la investigación. Watson y Labs proponen técnicas de diseño climático para reducir los costos de climatización, utilizando los flujos térmicos de energía en la naturaleza para alcanzar niveles de confort en las edificaciones. Presentan cincuenta estrategias de diseño desde el diseño del sitio, volumetría del edificio, diseño de envolvente y por último aberturas (Watson y Labs, 1983).

En este estudio se pretende determinar algunos de los mecanismos presentes en los sistemas naturales para regular el ambiente interior, como son los presentes en la arquitectura animal. Para esto se definió un universo de estudio de cinco casos para aplicarlos a un reto de diseño a partir de una envolvente arquitectónica.

2.3.- Justificación.

La aplicación de estrategias de climatización pasivas propias de la arquitectura bioclimática han demostrado un uso eficiente de la energía y de los recursos que le permite a las edificaciones responder de forma integral y armónica con el medio ambiente.

El principal beneficio que este proyecto puede aportar, será ampliar el conocimiento sobre este tipo de estrategias utilizando o reinterpretando las empleadas en las construcciones animales, donde la optimización en el uso de energía y recursos es determinante. Permitirá complementar los procesos de diseño y toma de decisiones en cuanto a los sistemas de regulación del ambiente interior. Por otro lado la metodología desarrollada tiene por objetivo generar una aplicación al diseño arquitectónico sin embargo se espera que esta pueda generalizarse a otros casos de diseño bioinspirados.

2.4.- Objetivos.

El objetivo principal de este estudio es ampliar las fuentes de información del diseño bioclimático a través de determinar las estrategias de climatización contenidas en 5 casos de estudio de la arquitectura animal, estas bajo tres ejes de estudio, orientación, ventilación y regulación térmica.

Como metas secundarias o productos de esta investigación se muestra una serie de fichas sintéticas de los mecanismos determinados para la muestra de estudio y una comparación de estas estrategias en las construcciones humanas. Segundo se presenta una metodología para reinterpretar y aplicar los descubrimientos encontrados con base en sistemas naturales, utilizando como herramienta un comparativo de los mecanismos o funciones y un análisis climático.

Por último se propone el diseño conceptual y evaluación de una envolvente porosa con base en el uso de gaviones para alcanzar los mecanismos determinados en la investigación para su aplicación en climas cálido-secos.

2.5.- Hipótesis.

Las construcciones animales contienen componentes que regulan la condición climática interior, como lo es la regulación térmica, la ventilación o la orientación solar - eólica. Es posible interpretarlas, evaluarlas y reproducirlas según criterios y herramientas de la arquitectura bioclimática como aplicaciones en envolventes y sistemas de climatización pasiva en construcciones humanas.

3.- Marco teórico.

3.1.- Estado del arte – las construcciones animales.

Así como la reproducción, la búsqueda de alimentos, el control a la exposición de los elementos, la habilidad para construir pertenece a las estrategias de las especies para sobrevivir. Los estudios de construcciones animales han sido abordados particularmente por los etólogos, quienes las estudian desde el punto de vista de comportamiento animal en el medio circundante.

La sociabilidad entre individuos es un término amplio que refiere una serie de interacciones entre ellos. En la biología se utiliza el término eusociabilidad, para describir un nivel de sociabilidad alto. Según Gould y Grant, este nivel se da particularmente en el Orden Hymenoptera, donde esta condición evolucionó en primera instancia en la arquitectura de los nidos (Gould y Grant, 2007).

Los insectos sociales se encuentran en la cúspide de la evolución entre los invertebrados, algunos viven en comunidades de varios millones de individuos, coordinan la construcción del nido, la provisión de alimentos, la reproducción y el cuidado de la descendencia (Gould y Grant, 2007).

Es posible que un buen número de especies encuentren condiciones ambientales similares a las de los seres humanos y la necesidad de resolver problemas similares. Estos organismos tienden a operar dentro de la capacidad ambiental de un lugar específico y dentro de los límites de la energía y la disponibilidad de materiales, estos límites, promueven la adaptación de los individuos y de sus comportamientos.

La arquitectura animal no se mide en parámetros de dinero pero si en términos de energía y tiempo invertido en el proceso de construcción, viabilidad y efectividad de materiales, transportación, etc. (Pallasmaa, 1995).

Existe un complejo vínculo entre la sociabilidad y la construcción de espacios, el desarrollo de la arquitectura animal ha sido empujado por la sociabilidad y viceversa. Por ejemplo para Jones y Oldroyd parte del éxito de los insectos sociales reside en la habilidad de regular la temperatura interna del nido, al menos en cierto grado (Jones y Oldroyd, 2007).

Así cuando se trata de extraer el conocimiento de arquitecturas pasadas hay que situarse en realidades que tal vez ya no existen o para las cuales hay que imaginar cuales eran sus necesidades o motivaciones. James Gould y Carol Grant comentan que en muchas circunstancias debemos de confiar en la intuición y analogía para deducir las motivaciones de los animales constructores (Gould y Grant, 2007).

Los primeros estudios sobre construcciones animales, desde el punto de vista de la etología, se le atribuyen al zoólogo Karl von Frisch, quien recibió junto con Konrad Lorenz y Niko Tinbergen un premio Nobel de medicina y fisiología en 1973, por sus estudios sobre comportamiento animal (Gould y Grant, 2007).

Basado e inspirado en la obra de Frisch (*Animal Architecture*, 1974) el arquitecto Juhani Pallasmaa, realiza una exposición sobre construcciones animales de la cual publica en 1995 la obra, *Animal Architecture*. Obra que desde el punto de vista de un arquitecto describe para los no especialistas la complejidad e inmensa variedad de los habitáculos animales, mostrando similitudes con la arquitectura del hombre.

El investigador Mike H Hansell de la Universidad de Glasgow especializado en arquitectura animal ha publicado varios libros sobre el tema, el más reciente *Built by animals*, Oxford University Press, 2007. Presenta varios ejemplos de construcciones animales y sus funciones como ventilación, termorregulación, etc.

Similar a la obra de Pallasmaa en cuanto a que es una publicación dirigida a no especialistas y con un cierto enfoque a la arquitectura del hombre, aunque en este caso escrita por un especialista en comportamiento animal.

De la Universidad de Princeton el investigador James L. Gould y la escritora Carol Grant Gould publican con un enfoque más marcado en la etología *Animal Architects, Building and the evolution of intelligence*, Basic Books, 2007.

Las referencias citadas anteriormente son de fácil acercamiento para quienes se aproximan desde disciplinas propias al diseño. En particular resultan útiles para realizar una preselección de casos de estudio.

Sin embargo para desarrollar una investigación profunda sobre los mecanismos de climatización contenidos en algunos ejemplos de construcciones animales, se requiere una revisión directa de las fuentes especializadas, como se muestra en los siguientes capítulos y en la lista de referencias consultadas.



Figura 3.1: Izquierda, nido de termitas, *Cubitermes* en Guinea. Fuente:mesomorph.org. Derecha, Longhua Pagoda, Shanghai. Fuente:shanghai.gov.cn. Según Pallasmaa, las cubiertas del nido *Cubitermes* tienen la función de proteger contra las torrenciales lluvias (Pallasmaa, 1995).



Figura 3.2: Nido colectivo de una de las pocas especies sociales de aves, *Philetairus socius*, en el desierto de Namibia. Izquierda, vista general del conjunto, fuente: <http://adlayasanimals.wordpress.com>. Derecha, vista desde abajo donde se aprecian los accesos, fuente: <http://octopup.org>.

La biomimesis o la biónica son disciplinas emergentes de reciente aparición que tratan de inscribirse dentro de la sustentabilidad, se presentan de manera clara en instituciones de investigación, como son algunas de las Universidades más reconocidas, como la Universidad de Harvard, el Instituto Tecnológico de Massachusetts y una de las escuelas de diseño arquitectónico más influyentes en las últimas décadas, la Architectural Association en Londres.

Instituciones con programas relacionados a la biomimesis.

- Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering, Harvard University.
<http://wyss.harvard.edu/>
- Centre for Biologically Inspired Designs, Georgia Tech.
<http://www.cbid.gatech.edu/>
- EMTECH, Emergent Technologies & Design Programme, Architectural Association, AA.
<http://emtech.aaschool.ac.uk/>
- MITMECHE, Biomimetics Robotics Lab, Massachusetts Institute of Technology, MIT
<http://biomimetics.mit.edu/>

Principales Publicaciones	Artículos	Tema	Frecuencia
Biomaterials (Elsevier)	484	Biomimetic	17.50%
Bioinspiration and Biomimetics(IOP)	343	Robot	13.00%
Journal of Biomedical Materials Research A (Wiley)	228	Based	11.60%
		Model	7.50%
		Design	6.80%

Tabla 3.1: Principales publicaciones sobre la investigación en biomimésis en cuanto a cantidad de artículos presentados. Y principales temas en base a los términos que aparecen en el título. Fuente:Lepora, Verschure y Prescott, 2013.

Ejemplo de un diseño arquitectónico inspirado en una especie animal.

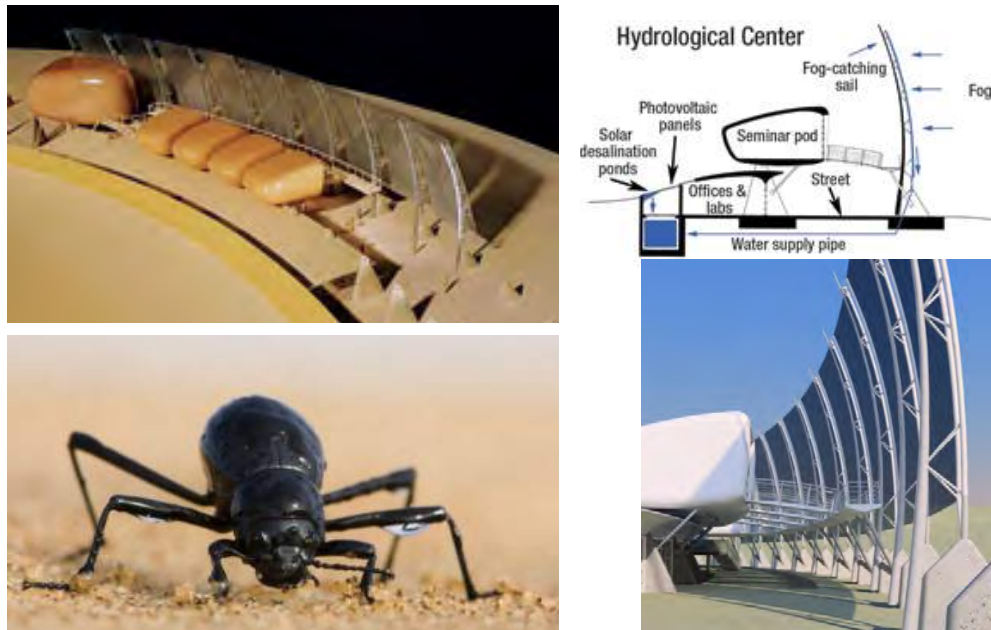


Figura 3.3: Hydrological Center, University of Namibia. Captador de niebla, inspirado en el escarabajo *Stenocara gracilipes*, condensa la humedad contenida en la niebla en la superficie de su espalda, diseño de Matthew Parkes. Fuente:enr.construction.com

3.2.- Definición de conceptos.

A continuación se presentan la definición de algunos de los conceptos más utilizados en este trabajo tratando de mostrar la relación entre ellos y como es que permiten ordenar la masa de ideas aquí expuestas.

- Arquitectura animal.
- Sistemas de climatización pasiva.
- Estrategias bioclimáticas.
- Orientación solar - eólica, ventilación natural y regulación térmica.
- Inercia térmica y enfriamiento evaporativo directo.

I. Arquitectura animal.

El término arquitectura animal se emplea de forma poética para describir las construcciones o más claramente nidos y madrigueras de algunas especies animales. Poético ya que pretende ligar el término arquitectura que es una actividad decidida y consciente propia de las sociedades humanas con la habilidad de construcción como parte de la supervivencia de algunas especies no humanas.

Hay que distinguir que entre la inmensa variedad de construcciones animales las propias de los insectos sociales presentan mayor interés en cuanto a la forma en que tratan de regular el ambiente interior probablemente porque albergan a varios miles e incluso millones de habitantes y por tanto requieren ser más eficientes. Gould y Grant comentan que de millones de especies de insectos solo unos cuantos miles son sociales, únicamente las termitas y parte del Orden Hymenoptera compuesto por avispas, abejas, hormigas, etc. (Gould y Grant, 2007). A eso se debe que la selección de casos de estudio se haya desarrollado hacia estas especies, sin que esto signifique para otros investigadores o diseñadores que sea la única fuente válida de información.

II. Sistemas de climatización pasiva.

Los sistemas de climatización pasiva a los que se hace mención, se refieren a las técnicas y procesos de adecuación ambiental para alcanzar las condiciones de confort al interior de un espacio. Martínez Strevel los define como aquellos que forman parte de la arquitectura y que están acoplados de tal manera a las características del medio ambiente, que logran captar, rechazar, transferir, almacenar, etc. energía de forma natural (en Lacomba Ruth et al., 1991). Según cita Spyros Amourgis, los sistemas pasivos empleados en edificios implican el uso de energías renovables (viento, radiación solar, etc.) para calentamiento o enfriamiento y para maximizar el uso de luz natural y ventilación (en Santamouris, 2006).

Esto implica que las decisiones de diseño como la orientación, la ubicación de las aberturas, los materiales de la envolvente, el esquema general, entre otras, son los elementos fundamentales con los cuales se conforman estos sistemas.

En la arquitectura animal no se utilizan energías proveniente de combustibles fósiles y de alto impacto ambiental, sin embargo sí se distingue entre las estrategias de climatización pasivas y activas. Las estrategias activas son aquellas que implica una acción por parte de los habitantes, como el aleteo al interior de un nido de abejas para aumentar la ventilación. En contraste las pasivas forman parte integral de la arquitectura del nido, como la ubicación, la orientación solar, las cualidades de la envolvente, etc. (Hozumi *et al.*, 2005).

III. Estrategias Bioclimáticas.

Las estrategias bioclimáticas son aquellas que basadas en el análisis de las condiciones ambientales sugieren las decisiones de diseño a seguir, es decir sugieren el uso de los sistemas pasivos más apropiados dependiendo del clima al cual está dirigido. Para esto se han desarrollado una serie de herramientas metodológicas, diagramas y matrices que permiten establecer las acciones de diseño a seguir. Algunas de las más utilizadas, la matriz de mecanismos de transferencia de calor (Watson y Labs, 1983), la carta bioclimática (Olgay, 1963. Arens *et al.*, 1980. Szokolay, 1984), la carta psicrométrica (Givoni, 1981), los triángulos de confort (Evans, 2000), entre otras.

A continuación se presenta una breve descripción de algunas de las estrategias de climatización pasivas más utilizadas en el diseño bioclimático.

a) Orientación solar - eólica.

La orientación es una de las estrategias pasivas más relevantes a lo largo de la vida útil de un edificio y factor relevante en el desempeño energético del mismo. La mejor orientación de un edificio es aquella que mantiene un equilibrio entre los factores térmicos y de iluminación natural. Los primeros deben asegurar las ganancias solares durante los periodos de bajo calentamiento, usualmente al sur este, y evitar esas mismas ganancias durante los periodos cálidos usualmente al sur poniente, al menos para latitudes similares a la de México. Para los requerimientos lumínicos, en general se prefiere la luz indirecta (principalmente Norte), ya que no deslumbra y genera mucho menores sombras que la luz directa, por otro lado no contiene el componente térmico.

La orientación también debe considerar la ubicación de los espacios en relación a la cantidad de luz y de calor dependiendo los horarios de uso, como si la planta de distribución del edificio fuera un reloj solar. Otro aspecto importante de la orientación está relacionado con la ventilación si se quieren aprovechar las principales corrientes de viento y dirigirlas a través del edificio ya sea para renovar el aire interior o para disipar calor.

Una buena orientación se consigue ubicando las superficies acristaladas en dirección del sol dependiendo si se quiere calentar o enfriar. También orientando superficies tales como muros y techos con la correcta selección de materiales para obtener ganancias indirectas. Sin embargo también es posible conseguir o mejorar la orientación, utilizando salientes en las fachadas, tragaluces, parteluces, luminoductos, etc.

b) Ventilación natural.

La ventilación natural en edificios es usada en general para mantener la calidad del aire interior y el confort térmico, aunque también relevante en el control acústico. La calidad del aire se puede conseguir logrando infiltrar la tasa de ventilación requerida para que la cantidad de gases contaminantes sea siempre inferior al máximo permitido.

El confort térmico está relacionado entre otros, con los principales parámetros del aire (temperatura, humedad, velocidad, etc.) y es posible regularlo controlando estas variables. El uso de ventilación con fines térmicos incluye dos objetivos, la disipación de calor sobre los usuarios mediante el enfriamiento convectivo o enfriamiento evaporativo y la disipación de calor sobre la estructura del edificio para reducir las necesidades de aire acondicionado. Estos últimos objetivos usualmente requieren de tasas de ventilación mucho mayores que para la renovación del aire interior por lo que es un reto más complejo (Santamouris, 2006).

La ventilación es uno de las principales mecanismos a utilizar en climas cálidos y cálido-húmedos, y uno de los principales a regular en climas fríos. Según Santamouris la ventilación diurna en climas templados y nocturna en climas cálidos a probado ser una técnica muy eficiente (Santamouris, 2005). Los mecanismos para producir ventilación es decir el movimiento de aire son el aprovechamiento del viento y el efecto *stack* o ventilación forzada, en ambos intervienen las diferencias de presión y temperatura (Santamouris, 2006).

c) Regulación térmica.

El principal objetivo de la regulación térmica es conseguir que la temperatura al interior del edificio, sea tal que el cuerpo de los habitantes realice el menor esfuerzo posible para mantener su equilibrio interno. Para esto se requiere del uso de varias estrategias bioclimáticas, debido a que se presentan variados mecanismos de intercambio de calor, por conducción a través de los muros, transmisión de radiación solar a través de las ventanas, flujo de calor vía ventilación, acumulación de calor en los elementos de la envolvente, entre otros. Donde interactúan los principales mecanismos de transferencia de calor (conducción, radiación, convección). Todos estos factores interactúan entre sí de manera compleja y contribuyen al balance térmico de un edificio (Santamouris, 2006).

d) Inercia térmica.

La inercia térmica es uno de los mecanismos que intervienen en la regulación térmica de un edificio y una estrategia muy útil para conseguir pasivamente la climatización de los espacios. El flujo de calor no es instantáneo, depende entre otras cosas de la propiedad de los materiales a mantener su temperatura en el tiempo hasta que la cede, depende por tanto de sus características termofísicas y de su espesor.

Se considera que un material tiene más o menos inercia térmica cuando mayor sea el tiempo en que ocurra el máximo de temperatura del aire exterior y el máximo de temperatura del aire interior. La distribución y cantidad de masa térmica en un edificio afectará el desempeño térmico de los espacios, por lo que la correcta decisión de la orientación solar, la selección de materiales de la envolvente, la distribución de espacios y los horarios de uso de estos determinará que tan efectiva es el uso de la inercia térmica en la regulación de la temperatura.

Los espacios con horarios largos de ocupación se benefician más del uso de la inercia térmica de los materiales de la envolvente, ya que permite aprovechar el desfase en el tiempo, mientras que para espacios con horarios de ocupación cortos es menos útil. Sin embargo en climas cálidos, si se combina con la ventilación nocturna es posible evitar que el calor ganado durante el día no se propague al interior sino hasta la noche donde es apropiado disiparlo mediante ventilación para iniciar el ciclo nuevamente (Santamouris, 2006).

e) Enfriamiento evaporativo directo.

El enfriamiento evaporativo directo se produce al generar la evaporación de agua al exponerla al flujo de viento y dirigir este flujo de aire humedecido hacia las zonas a enfriar. Como resultado la temperatura del aire disminuye debido a que el agua al cambiar de fase consume energía calorífica del ambiente. Su uso se recomienda para climas cálido y cálidos-secos, dado que estos sistemas agregan humedad al ambiente interior tienen la limitante de utilizarse en climas cálido-húmedos.

Existen varias aplicaciones de estos sistemas, en algunas de estas aplicaciones se utiliza un cuerpo de agua dentro de los espacios interiores como fuentes, albercas o estanques, en otras se agrega humedad al ambiente mediante el uso de la evapotranspiración de las plantas o de manera directa mediante vaporizadores o el riego de pavimentos. Otros como las torres de enfriamiento de la arquitectura vernácula en medio oriente utilizan textiles, o vasijas de barro para contener agua y que el paso del viento evapore el líquido, en versiones contemporáneas se utiliza vaporizadores dentro de las torres (Bowman, *et al.*, 2000).

4.- Metodología desarrollada.

La metodología que se presenta a continuación se desarrolla con el objetivo de alcanzar una aplicación arquitectónica, a partir de los mecanismos de climatización utilizados en algunas construcciones animales. Sin embargo se espera que pueda generalizarse a otras aplicaciones inspiradas en sistemas naturales y complementar así las herramientas y recursos del diseño bioclimático.

I. Objetivo – Reto de diseño.

Para poder determinar la muestra de estudio de construcciones animales a un universo manejable durante los tiempos de este trabajo, es necesario definir los alcances y objetivos del estudio. En este caso se propone definir un reto inicial de diseño. Plantear un problema de diseño a resolver y de ahí determinar si la selección o preselección de casos de estudio presenta información relevante para este fin. Lo mismo que confrontar cada paso de la siguiente metodología con el reto de diseño a alcanzar.

Es posible determinar un solo caso de estudio y a partir de ahí desarrollar una aplicación que haya sido inspirada en los mecanismos encontrados. Uno de los riesgos de este camino es descubrir que el caso de estudio elegido no presenta información lo suficientemente interesante para los fines que se buscan o que no hay suficiente investigación al respecto. Dado que el análisis debe realizarse directamente de fuentes especializadas y cómo afirma Vanden Broeck (2000) el conocimiento del mundo natural se realiza a través de la ciencia, es decir está limitado a que el tipo de información que se busca ya haya sido generada de manera amplia por investigadores propios de las ciencias naturales.

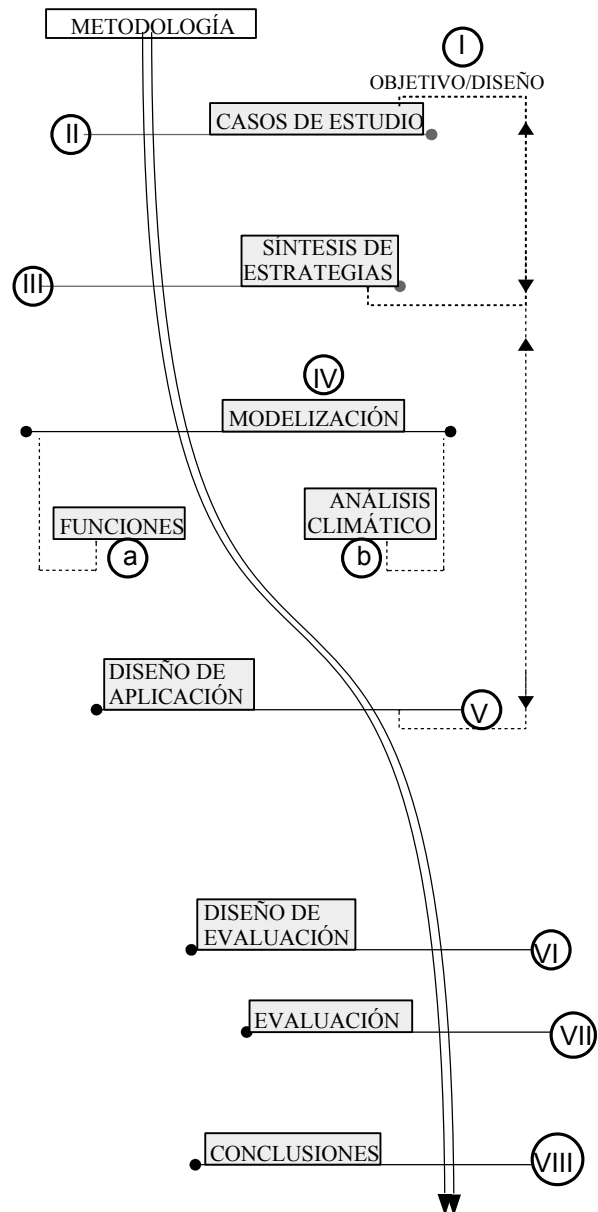


Figura 4.1: Esquema de metodología desarrollada. (Elaboración propia)

En este caso se decidió la búsqueda de un universo de estudio lo más amplio posible, únicamente limitado por razones de tiempo y que presentaran mecanismos de climatización relevantes para el problema de diseño planteado.

“Reto de diseño – Diseño de envolvente térmica arquitectónica”

Uno de los componentes más relevantes en el desempeño bioclimático de un edificio es la envolvente, ya que representa el primer filtro de interacción de un edificio con los componentes del sitio. El clima, el contexto físico y social, entre otros. Por lo que es factor determinante en las condiciones de confort o ausencia de él y por extensión del uso de energía para enfriamiento, calentamiento o iluminación.

Los flujos de energía con los que se encuentra en relación dinámica una envolvente pueden englobarse desde el análisis térmico, ya que incluye los tres mecanismos físicos de intercambio de energía, la radiación, la conducción y la convección. Y los intercambios de energía por cambios de fase de la materia. Por lo que como punto de partida se decidió establecer como objetivo el diseño de una envolvente arquitectónica con cualidades térmicas.

Como se observará durante el desarrollo de esta investigación el objetivo inicial de diseño es una meta que deberá complementarse, refinarse y retro alimentarse con base en los descubrimientos encontrados en los casos de estudio, ya que representan información valiosa al diseño pasivo.

II. Selección de casos de estudio.

Se realizó una preselección de ocho casos de estudio que presentaran en una consideración rápida, mecanismos y estrategias relevantes al diseño de una envolvente arquitectónica. Particularmente se utilizaron fuentes no especializadas, debido a que pueden procesarse de manera rápida. Como la publicación del arquitecto Juhani Pallasmaa, *Animal Architecture* (1995) o publicaciones por parte de expertos pero orientadas a público no especializado, como el investigador Mike H Hansell en *Built by animals* (2007).

De la preselección se acotó a cinco casos que fueron desarrollados de manera amplia, a partir de la calidad y cantidad de información encontrada en fuentes especializadas. Se establecieron tres ejes de estudio para clasificar la muestra en cuanto a estrategias de climatización encontradas y que fueran relevantes al diseño de una envolvente: Orientación, ventilación y termorregulación. La estructura de cada caso incluye, una introducción a la estrategia mencionada, desarrollo del caso y conclusiones parciales de cada ejemplo, a las que se les denominó, “Interpretación Bioclimática”. También se incluyen algunos otros mecanismos reportados en la bibliografía, recordando que el objetivo principal de este estudio es generar un banco de conocimientos al servicio del diseño.

III. Síntesis de estrategias.

Con la investigación de los casos de estudio lista es necesario presentar los resultados en forma sintética, para esto se generaron una serie de fichas sintéticas de cada caso de estudio. Ya que el objetivo principal es hacerse de un acervo de conocimientos útiles de aplicarse en el área del diseño, la síntesis de resultados procura mostrar los mecanismos de climatización pasiva relevantes al problema de diseño y aspira a generar un banco de conocimientos al servicio de otros diseñadores.

Nótese que una investigación profunda se enfoca en conseguir resultados en cuanto a las funciones y mecanismos contenidos en los sistemas y organismos naturales, más que en el carácter únicamente formal, lo cual resulta una tentación común para los diseñadores que trabajan constantemente con formas más que con funciones. Como menciona Scott Turner la biomimesis debe buscar un funcionamiento bioinspirado y no un biomorfismo (2013). En el caso de la arquitectura bioclimática los resultados deben orientarse a las estrategias de climatización utilizadas en el mundo natural y menos en la forma de estas. A pesar de que en muchas ocasiones la función bioclimática produce ciertas formas en particular, la antigua discusión sobre forma y función permanece vigente.

Las fichas sintéticas de resultados incluyen las siguientes características:

- a) Alto contenido gráfico y sintético que permitan una lectura rápida, enfocada a diseñadores.
- b) Tres ejes de estudio pertinentes al reto de diseño (ventilación, orientación, termorregulación)
- c) Por último se decidió incluir similitudes entre los constructos del hombre y aquellos determinados durante la investigación para los organismos naturales. Por ejemplo los sistemas de ventilación de la arquitectura tradicional y sus similitudes con las estrategias de ventilación en la arquitectura animal. Esto permite crear puentes de comunicación más sólidos entre dos disciplinas usualmente desligadas.

IV. Modelización de estrategias de la muestra de estudio – Funciones y análisis climático.

Para interpretar y aplicar las estrategias encontradas en los casos de estudio es necesario traducir los resultados al lenguaje propio de cada disciplina. Modelizar las estrategias significa darles forma a partir de una abstracción por medio de matrices, diagramas, gráficas u cualquier otra herramienta que permita extraer los mecanismos esenciales detrás de cada función.

Esto se consigue determinando los procesos físicos que promueven las funciones estudiadas. Ya que la física es el intermediario entre ambas disciplinas, es decir las leyes de la física aplican para todas las especies, por lo tanto pueden reproducirse en otras aplicaciones, para su posterior evaluación.

a) Funciones.

A partir de las matriz de estrategias de climatización de Watson y Labs (1983) y diagramas de funciones por cada caso de estudio, se realizó un análisis comparativo con base en similitudes, diferencias, relaciones entre las partes y las funciones, las funciones y la condición climática, etc. Por otro lado también se confrontaron con la aplicación que se pretende diseñar.

b) Análisis climático.

Para generar un diseño bioclimático es necesario incluir un análisis climático donde se considera que la creación de espacios está íntimamente ligada a las fuerzas y energías sitio.

La modelización de estrategias permite seleccionar las funciones a reinterpretar y también permite observar si los mecanismos determinados pueden relacionarse a una condición climática. O si los casos de estudio se sitúan en climas distintos y los rangos de confort no son comparables, aún así es posible encontrar relaciones útiles de reinterpretar. A partir de ahí se pudo evidenciar que las estrategias seleccionadas en conjunto son eficientes para aumentar las horas de confort en los climas cálidos secos.

V. Diseño de aplicación.

Una vez determinadas las estrategias a reinterpretar y ubicadas en una condición climática en particular, es posible generar diseños que contengan los mecanismos esenciales, el uso de materiales, la manera de construir y también las formas que expresan las funciones anteriores. Es decir ya se ha generado un acervo de conocimientos al servicio del diseño.

El objetivo de diseño planteado inicialmente como una envolvente térmica se confrontó con las estrategias y a la condición climática determinada y a partir de estas se perfeccionó a:

“Diseño de una envolvente porosa para climas cálido-secos con cualidades de retardo térmico, ventilación y enfriamiento evaporativo directo.”

A partir de un sistema constructivo existente como son los muros gaviones, se proponen distintas posibilidades, modificaciones, adecuaciones y características para alcanzar los mecanismos seleccionados. Como es la porosidad de este tipo de envolventes y la variación de la misma para promover la ventilación, calibrar el retardo térmico y propiciar el enfriamiento evaporativo directo.

VI. Diseño de evaluación.

El diseño de evaluación se determinó con base en las cualidades y al desempeño bioclimático que se pretende alcanzar en el reto de diseño ya perfeccionado. No es relevante incluir en la evaluaciones si la aplicación generada es comparable en eficiencia o desempeño a los sistemas naturales en los que está basada, es decir lo que se somete a evaluación es la aplicación generada con base en las funciones que se espera que cumpla.

VII. Evaluación.

Se realizaron una serie de análisis experimentales utilizando muestras de gaviones de piedras de 0.60 X 0.60 X 0.30m. Se evaluaron en cuanto a las siguiente características:

- a) Análisis de porosidad – porcentaje, densidad y absorción.
- b) Análisis de ventilación – velocidad, volumen y trayectoria del aire.
- c) Análisis térmico – conductividad y retardo térmico.

Debido a las limitaciones en tiempo y recursos de este estudio se decidió dejar pendiente a futuras evaluaciones el desempeño de enfriamiento evaporativo directo de las muestras de estudio. Sin embargo los resultados obtenidos durante el análisis de porosidad y ventilación resultarán útiles para desarrollar investigaciones futuras.

VIII. Conclusiones.

Las conclusiones se desarrollan en lo general en cuanto a la hipótesis inicial planteada anteriormente. Y de forma particular sobre la utilidad de esta metodología para investigaciones similares. Sobre la aplicación generada y al desempeño observado durante la evaluación. Por último se exponen recomendaciones generales de diseño a partir de los descubrimientos obtenidos en el desarrollo de este trabajo.

5.- Muestra de estudio de construcciones animales, clasificación por estrategia bioclimática.

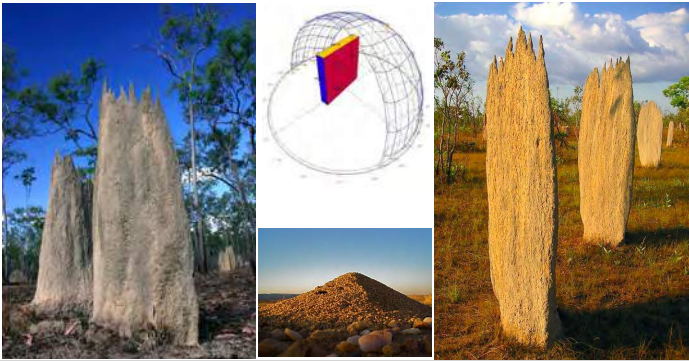

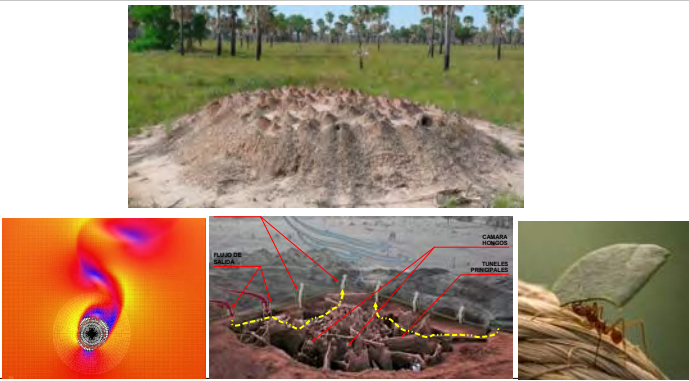

Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Isoptera	
Familia	Termitidae	
Especie	<i>Amitermes meridionalis</i> , <i>A. laurenensis</i> (termita)	
Ubicación	Darwin, Norte de Australia	
Clima	Cálido húmedo	
Estrategias	Orientación Estrategia térmica para una cara de la estructura, ocupación preferencial en la fachada con mayores ganancias térmicas, respuesta adaptativa a las condiciones ambientales locales, variación en la orientación según los vientos y el sombreado.	
Comentario	Estrategia similar en cuanto a orientación y ocupación preferencial de espacios de la hormiga <i>Pogonomyrmex occidentalis</i> estudiadas en Colorado.	
Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Isoptera	
Familia	Termitidae	
Especie	<i>Macrotermes michaelseni</i> (termita)	
Ubicación	Sudafrica	
Clima	Cálido seco	
Estrategias	Ventilación Ventilación forzada por gradiente de velocidad, interacción con vientos turbulentos, resonancia y renovación del aire por mezcla acústica.	
Comentario	Ver Eastgate Center en Harare, Zimbabwe y CH2 en Melbourne, Australia de Mick Pearce, utiliza el modelo de termosifón propuesto en los años 60.	
Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Hymenoptera	
Familia	Formicidae	
Especie	<i>Atta Laevigata</i> , <i>A. capiguara</i> y <i>A. vollenweideri</i> . (hormiga)	
Ubicación	Sudamérica	
Clima	Varios	
Estrategias	Ventilación Ventilación forzada por gradiente de velocidad, adaptación a condiciones locales y dispositivos para maximizar el uso del viento.	
Comentario	Ver estudio sobre las madrigueras del perrito de la pradera, propone que los bordes rectos en las aberturas, promueven mayor velocidad que los bordes curvos (Vogel S. et al., 1973)	
Reino	Animalia	
Filo	Chordata	
Clase	Aves	
Orden	Varios	
Familia	Varios	
Especie		
Ubicación		
Clima		
Estrategias	Termoregulación Cualidades térmicas del material (barro), auto sombreado (textura), amortiguamiento e inercia térmica, materiales locales y emplazamiento aprovechando el sitio.	
Comentario	Golondrina de acantilado (<i>Petrochelidon</i>), <i>Merops bullockoides</i> (Sudafrica), tejedor republicano (<i>Philetairus socius</i> , Sudafrica), Horneros (<i>Furnarius rufus</i> , Argentina)	

Figura 5.1: Preselección de casos de estudio con base en las estrategias bioclimáticas observadas. (Elaboración propia)

Muestra de estudio de construcciones animales – Clasificación por estrategia bioclimática

Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Hymenoptera	
Familia	Vespidae	
Especie	<i>Vespula, Dolichovespula, Polistes</i> , entre otras (avispas)	
Ubicación	Varios	
Clima	Varios	
Estrategias Sistema	Termoregulación Amortiguamiento térmico (enterrado), Envoltente con cavidad de aire, enfriamiento evaporativo, ganancias internas (metabólicas), material (papel), forma como protección a la lluvia.	
Comentario	Emplazamiento dentro de cavidades, enterrado o suspendido en arboles o áticos Ver propiedades térmicas y constructivas del papel (Shigeru Ban). Conexión de las celdas a 120°, aprovechado en Nomex o Kevlar de Dupont.	
Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Hymenoptera	
Familia	Vespidae	
Especie	<i>Polybia spinifex</i>	
Ubicación	Japón, Brasil y Argentina	
Clima	Varios	
Estrategias	Ventilación Forma y proporciones de la abertura, inercia térmica del material (similar al barro)	
Comentario	Complemento para el caso anterior	
Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Hymenoptera	
Familia	Apidae	
Especie	<i>Apis mellifera</i>	
Ubicación	Varios	
Clima	Varios	
Estrategias	Termoregulación Amortiguamiento térmico (cavidades y capas de aislamiento), enfriamiento evaporativo, ganancias internas (metabólicas y radiación solar), modificación de la relación Superficie/Volumen (<i>cluster</i>).	
Comentario	Envoltente de tres capas en especies sin aguijón, batumen(muro de propoleo), contenedores de polen y miel (cerumen) y el involucrum (delgadas laminas de cerumen).	
Reino	Animalia	
Filo	Artrópodo	
Clase	Insecta	
Orden	Orthoptera	
Familia	Gryllotalpidae	
Especie	<i>Scapteriscus, Neocurtilla</i>	
Ubicación	Todo el territorio	
Clima	Varios	
Estrategias	Acústica Utilización del espacio con fines acústicos, amplifica y dirige el sonido con la topografía.	
Comentario		

Figura 5.2: Preselección de casos de estudio con base en las estrategias bioclimáticas observadas. (Elaboración propia)

Matriz descriptiva de la muestra de estudio.

Se preseleccionó un grupo de ejemplos de hábitculos animales para utilizarse como muestra de análisis. Se clasificó la muestra en cuanto a las principales estrategias bioclimáticas observadas para posteriormente elegir cinco casos destacados de la muestra para un estudio detallado y su posible aplicación al problema de diseño definido inicialmente.

CASO	FORMA	ESTRATEGIA PRINCIPAL	ESTRATEGIA SECUNDARIA
TERMITA <i>A. meridionalis</i> <i>A. laurensis</i>	ALARGADA	ORIENTACIÓN	
		Interactuar con los vientos locales	Térmica
TERMITA <i>Macrotermes</i> <i>michaelseni</i>	COMPACTA	VENTILACION	
		Ventilación forzada por gradiente de presión, interacción con vientos turbulentos	Resonancia y renovación del aire por mezcla acústica
HORMIGA <i>Atta laevigata</i> <i>Atta vollenweideri</i>	COMPACTA	VENTILACION	
		Ventilación forzada por gradiente de presión	Adaptación a condiciones locales y dispositivos para maximizar la energía del viento
AVES	VARIAS	TERMOREGULACION	
		Amortiguamiento e inercia térmica	Emplazamiento y materiales
AVISPAS <i>Polistinae</i> <i>Vespinae</i>	COMPACTA	TERMOREGULACION	
		CALENTAR Ganancias internas Emplazamiento Masa térmica	Metabólicas Enterrado o contenido en cavidades, sombreado Cavidad de aire perimetral – Envoltente
		ENFRIAR Enfriamiento evaporativo Ventilación	Depósitos de agua + ventilación Estrategia activa de los individuos
	EN OCASIONES ALARGADA	MATERIAL	Impermeable – Protección a la lluvia Capas – Cavidades de aire intermedias Cavidad de aire entre el terreno y la envoltente Modular (hexágono) – Estructural y eficiente
AVISPAS <i>Polybia spinifex</i>	COMPACTA	VENTILACION	
		Forma y proporción de la abertura	Material – inercia térmica
ABEJAS <i>Apis mellifera</i> <i>Meliponini</i>	COMPACTA	TERMOREGULACION	
		CALENTAR Ganancias internas Emplazamiento Amortiguamiento térmico	Metabólicas Enterrado o contenido en cavidades, sombreado Envoltente – Capas de aislamiento
		ENFRIAR Enfriamiento evaporativo Ventilación	Depósitos de agua + ventilación Estrategia activa de los individuos
		MATERIAL	Modular (hexágono) – Estructural y eficiente
GRILLO TOPO <i>Gryllotalpidae</i>	ALARGADA	TOPOGRAFIA ACUSTICA	
		Utilización del espacio con fines acústicos	Amplificación y dirección del sonido

Tabla 5.1: Matriz de casos de estudio según la principal estrategia bioclimática observada. (Elaboración propia)

Se muestra en los recuadros rojos la selección de casos a desarrollar a partir de la cantidad y calidad de información encontrada en estudios especializados y en cuanto a su relevancia al reto inicial de diseño. El caso de las Avispas *Polybia spinifex*, se decidió conjuntarlo dentro del grupo de estudio de Avispas – Termoregulación. El caso de Aves, a pesar de presentarse como un ejemplo relevante y con información valiosa se decidió no incluirse en la selección final por razones de tiempo y por último el caso de los Grillos Topo, se eliminó por ser de poca relevancia al reto de diseño.

Clasificación por estrategia bioclimática.

5.1.- Orientación.

I. Emplazamiento en la arquitectura.

El emplazamiento esta relacionado con la orientación y con la topografía local. Ubicar una edificación en la ladera de una pendiente tendrá efectos sobre la orientación general, así si se emplaza un edificio sobre la ladera norte estará menos asoleado durante el invierno y más en verano.

De igual forma el emplazamiento en una u otra pendiente, tendrá un efecto en como impactan con los vientos locales en el edificio, ya que las diferencias de calentamiento y la forma de la topografía modifican los patrones de viento, dándose así efectos como los vientos de ladera o los de valle.

En zonas planas el emplazamiento es más importante relacionarlo con los elementos inmediatos del entorno, ya sea porque producen sombra o no. Otros como cuerpos de agua modifican la dirección del viento por movimientos convectivos.

En ambas situaciones es posible mejorar el emplazamiento con elementos que modifiquen la incidencia solar y el viento. Estos pueden ser elementos paisajísticos como vegetación o cuerpos de agua o arquitectónicos y urbanos como pergolados.

La elección de un buen emplazamiento facilita la orientación en el diseño, tanto para relacionarse con un eje térmico o eólico. Podríamos decir que el emplazamiento es un paso anterior a la elección de las orientaciones, sin embargo no siempre es posible elegir el emplazamiento, en particular en las grandes ciudades donde el tamaño y la traza de los lotes es determinante en el emplazamiento o en la orientación.

II. Orientación en la arquitectura.

La orientación en la arquitectura y el urbanismo conlleva varios factores: la topografía, la exigencia de privacidad y vistas. Las climáticas tanto en el componente térmico como el eólico (Olgay, 2010).

La orientación en el diseño bioclimático se refiere a la elección de la disposición de la planta y la relación con los principales elementos climáticos. La radiación solar, en su componente térmico y lumínico, y la incidencia de los vientos locales. Se dice que un edificio tiene una orientación tal cuando, debido a su forma la mayor superficie de su envolvente esta perpendicular a un punto cardinal.

La orientación es uno de los elementos de diseño básicos y fundamentales en la arquitectura y en el diseño urbano. Favorece o desfavorece el confort y por tanto es una estrategia de climatización pasiva. Es una de las primeras decisiones de diseño que se toman y que repercutirán en el futuro del edificio y de sus usuarios.

Olgay propone abordar el tema de la orientación desde la conjunción Sol – Aire, es decir considerar la radiación solar y la temperatura del aire como los factores que en conjunto permite alcanzar la sensación de confort.

Es decir la mejor orientación será aquella que permita recibir la mayor cantidad de radiación durante la temporada fría y la menor radiación durante la temporada más cálida (Olgay, 2010).

El diseño de la edificación en relación a la orientación es un instrumento que permite precisión para elegir que horas del día es necesario aumentar la radiación recibida o la ventilación. Un ejemplo es la ciudad de México que usualmente requiere de calentamiento por las mañanas y no tanto por las tardes que son templadas. Una orientación sureste sería adecuada para este requerimiento.

A la consideración Sol – Aire es necesario agregar como complemento el viento, ya que puede resultar un factor a favor de las condiciones de confort o en contra. En general se considera que durante los periodos de sobre calentamiento la incidencia del viento siempre es favorable y durante los periodos fríos es desfavorable. Es necesario agregar que si la temperatura del aire es mayor a la temperatura del cuerpo (35°C) entonces es mejor no ventilar aun cuando se encuentre en un periodo cálido.

La humedad es otro factor a considerar, en los climas cálido húmedos ventilar es una estrategia fundamental, mientras que en los cálidos secos hay que ser más preciso con las horas en las que es adecuado ventilar debido a la oscilación térmica que es común en este tipo de climas.

Según Olgay si un edificio recibe perpendicularmente el viento, el impacto será del 100% de la velocidad, mientras que si lo recibe a 45° será del 50% de la velocidad. Sin embargo en estudios posteriores se reporta que si el viento incide a 45° la velocidad media del aire interior aumentará (García Chávez y Fuentes Freixanet, 2005).

La elección en la orientación también favorece o desfavorece el confort lumínico, es decir la calidad y cantidad de la iluminación natural que un espacio recibirá. Usualmente se prefiere recibir la iluminación desde una orientación norte, ya que contiene el componente lumínico y en menor medida el térmico. Una buena elección en la orientación permitirá recibir mayor numero de horas de sol y por lo tanto depender en menor medida de la iluminación artificial.

El diseño arquitectónico acorde a la orientación puede ser considerado como sencillo, pero si se estiman las variables, temperatura del aire, cantidad de radiación, viento e iluminación resulta mucho más complejo equilibrar y jerarquizar cada una de ellas. Para ello hay que comparar los datos climáticos y los requerimientos de confort, para estimar con que recursos cuenta el sitio y que necesidades hay que cubrir.

III. Orientación en la arquitectura animal.

ORGANISMO	ESPECIE	ESTRATEGIA	UBICACIÓN	CLIMA
Termita	<i>Amitermes meridionalis</i>	Orientación	Australia	Cálido húmedo
	<i>Amitermes laurensis</i>			



Figura 5.3: Montículos de *Amitermes meridionalis* durante la época de lluvias, Fuente: savanna.org.au



Figura 5.4: Montículos de *Amitermes meridionalis*, Fuente: ozanimals.com

Las termitas pertenecen al orden Isoptera y entre sus características más sobresalientes es que son considerados insectos sociales ya que viven en comunidades muy numerosas, algunas especies pueden tener colonias de varios millones de individuos.

Las termitas utilizan distintas estrategias para controlar las condiciones de temperatura y humedad dentro de sus nidos, pueden ser pasivas o activas. Las pasivas se refieren a las estrategias que consiguen a través del comportamiento del nido, mientras que las activas requieren de la participación de los individuos.

Según CONABIO en México están catalogadas 62 especies aunque considera que la diversidad de especies ronda entre 110 y 150 especies.

La especie *Amitermes meridionalis* o *A. laurensis* es un tipo de termita que habita la parte norte de Australia que se le conoce como termitas brújula o magnéticas ya que alinean sus nidos con respecto a una orientación norte-sur.

Judith Korb reporta en un estudio que este tipo de montículos solo se presenta en tres especies, *A. meridionalis* que son constructoras obligadas de montículos brújula mientras que *A. vitiosus* y *A. laurensis* reproducen estos montículos solo en ciertas condiciones (Korb, 2003).

Usualmente se ubican en zonas bajas, inundables, en grupos numerosos de montículos, por lo que el alineamiento entre ellos es notoriamente constante. Sin embargo la orientación exacta varía de una ubicación a otra.

Durante la noche las termitas salen a buscar piezas de pastos secos que almacenan en cámaras dentro de los montículos. Estos almacenes son particularmente útiles durante la temporada de lluvias, ya que cada uno de los nidos se convierten en islas al estar rodeados de agua. (Hansell, 2007)

Según la investigación de Peter Jacklyn el rango de medidas de los montículos es de 2.0 x 1.0 x 0.5 m (altura x N-S longitud x E-W ancho), aunque otros autores reportan mayores medidas. Son estructuras aplanadas, relativamente convexas o cóncavas y con una tendencia a la vertical. Sus habitantes tienen un rango de temperatura óptima entre los 29° y 32° C para realizar varias actividades.

Los montículos de las termitas *Amitermes meridionalis* y *laurensis* varían geográficamente en su orientación media debido a una respuesta adaptativa a las condiciones ambientales locales (viento y sombreado). Jacklyn muestra según una estimación teórica de la irradiación solar y la orientación del montículo, que se busca dar preferencia una temperatura estable de la fachada este, especialmente durante la temporada seca en Mayo a Agosto (Jacklyn, 1992).

El estudio muestra la variación de orientación de los montículos en tres ubicaciones distintas al norte de Australia, con un rango de 1° a 10° y sugiere que esta variación es debido a una adaptación para compensar las condiciones locales, tales como la disminución de la temperatura debido a una mayor nubosidad y por el crecimiento de pastos que sombrean los montículos incluso hasta cubrirlos por completo o por el aumento en la velocidad del viento.

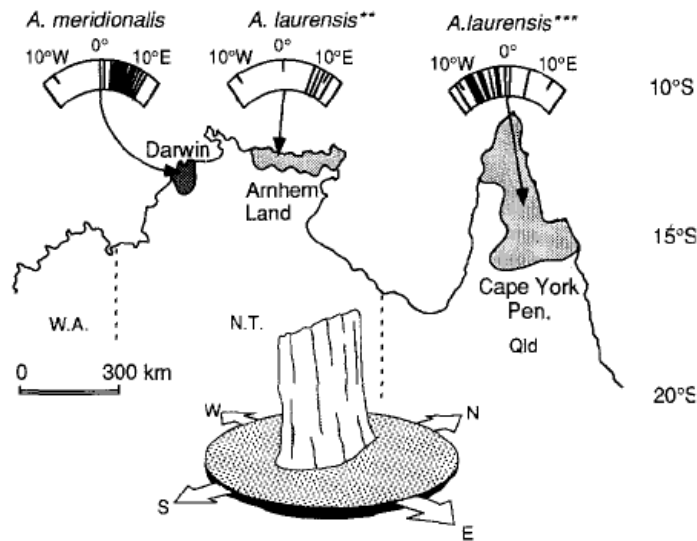


Figura 5.5: Distribución de montículos estudiados y la variación en la orientación en tres poblaciones en Australia, Darwin, Arnhem Land y Cape York Pen. Para *A. Meridionalis* la orientación varía de 10°E a 1°E, para *A. Laurentis* de 5° E a 11°W Fuente: Jacklyn, 1992.

Dado que Australia se encuentra en el hemisferio sur, la trayectoria del sol es distinta a la que percibimos en México. La ciudad de Darwin que es una de las más cercanas donde se han evaluado los montículos se encuentra a una latitud de -12.5° sur y una longitud 130.9° este. De igual forma las estaciones se dan en meses distintos a los de la República Mexicana.

Estaciones.

- a) Verano - Diciembre a Febrero
- b) Otoño - Marzo a Mayo
- c) Invierno - Junio a Agosto
- d) Primavera - Septiembre a Noviembre

El análisis de geometría solar de Jacklyn muestra que una variación de 10° W en la orientación produciría un aumento de 10% en la irradiación solar en la fachada este, durante los meses de Mayo a Agosto (invierno - secas) que es donde se presentan las menores temperaturas. Esto debido a que la altura solar al medio día es de 50 a 60° durante el invierno en contraste con la que se presenta de Diciembre a Abril que es de 75° en promedio. Modificando por tanto el ángulo de incidencia.

La variación en la irradiación que recibe el nido, afecta no solo las fachadas sino también la temperatura interior del nido. La cual también se ve afectada por factores externos como la nubosidad, el viento y las condiciones de sombreado que se presentan localmente. Para aislar los factores de orientación y temperatura, Jacklyn realizó un balance térmico en el que consideró los siguientes factores.

$$R + M = C + E + J + G$$

Donde:

R=Ganancias por radiación

M=Ganancias metabólicas

C=Perdidas de temperatura sensible por convección

E=Perdidas de temperatura latente por evaporación

J=Tasa de cambio de calor almacenado

G=Perdidas de temperatura por conducción hacia el ambiente

Se consideró que las ganancias metabólicas (M) serían despreciables dado que el nido es 98% sólido, es decir solo el 2% son ductos y cámaras. Y la ocupación de las termitas durante la época de secas es muy dispersa.

La evaporación (E) durante Mayo a Agosto es muy baja, según reporta es de menos del 4% del contenido interno, por lo que también se consideró como irrelevante.

Se estimó que el montículo tendría características similares a la de la tierra seca, por lo que tendría valores bajos de calor específico por lo que las ganancias por calor acumulado (J) sería muy pequeñas.

Se dedujo que los valores más relevantes en la temperatura del montículo serían las ganancias por radiación y las pérdidas por convección y conducción.

$$R = C + G$$

Además de los cambios en la cantidad de radiación (R) debido a la variación en la orientación o la nubosidad, se presentan factores que alteran la temperatura del montículo. El enfriamiento convectivo (C) producido por la velocidad del viento y el enfriamiento conductivo (G) por la variación en la temperatura del aire.

En la investigación de Jacklyn se giraron manualmente algunos montículos para medir las variaciones de temperatura y se concluyó que los cambios en la orientación no impactan la temperatura de la parte interna pero sí presentan importantes cambios en la temperatura de las caras.

Al mismo tiempo se presenta un gradiente de temperatura entre la cara este y la oeste. Dado que por las mañanas una está expuesta a los rayos solares y la otra está en sombra y lo opuesto sucede en las tardes.

Por otro lado se presentaron notables cambios en la temperatura de las caras debido al efecto del viento, que en su mayoría se presentó desde el este o las condiciones de nubosidad (Jacklyn, 1992).

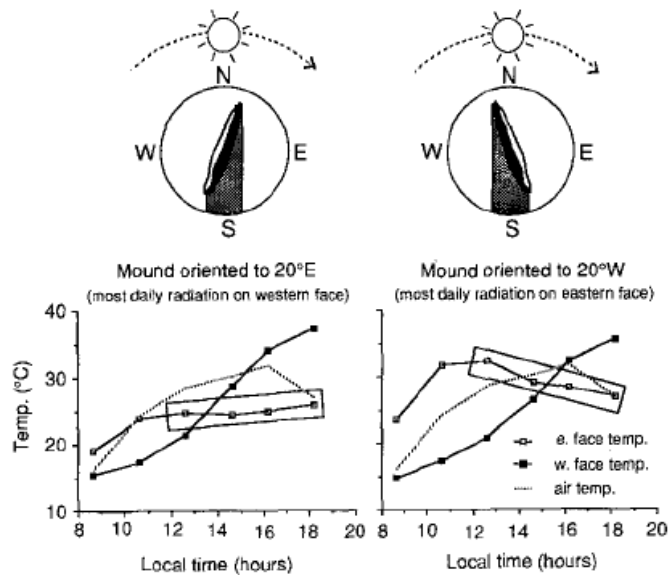


Figura 5.6: Efecto de la orientación en la fachada este y oeste.
Fuente: Jacklyn, 1992.

La conclusión de Jacklyn es que durante la temporada de lluvias (Noviembre a Abril) la temperatura y la humedad son confortables para las termitas y la orientación del nido y la radiación solar no tiene importantes efectos en los montículos ya que el sol se encuentra con un ángulo más vertical y se presentan condiciones de sombreado por una mayor nubosidad o por pastizales.

Durante la temporada seca (Mayo a Agosto) la temperatura y la humedad disminuyen y la orientación tiene un efecto considerable en el aumento de la temperatura de las fachadas, en particular se busca mantener la temperatura en las caras que están expuestas a condiciones de sombreado o mayores vientos, por lo que la fachada este en estos casos tendría mayor temperatura por las mañanas (Jacklyn, 1992).

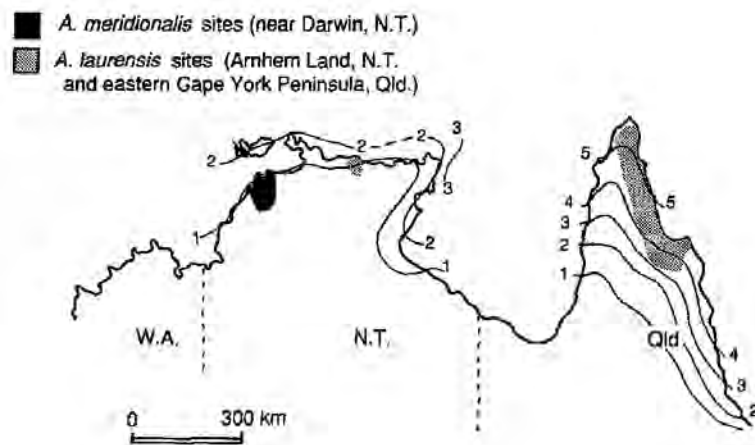


Figura 5.7: Nubosidad promedio para el área de estudio (Julio – 9:00am) estimado en octavas de cielo. Fuente: Jacklyn, 1992.

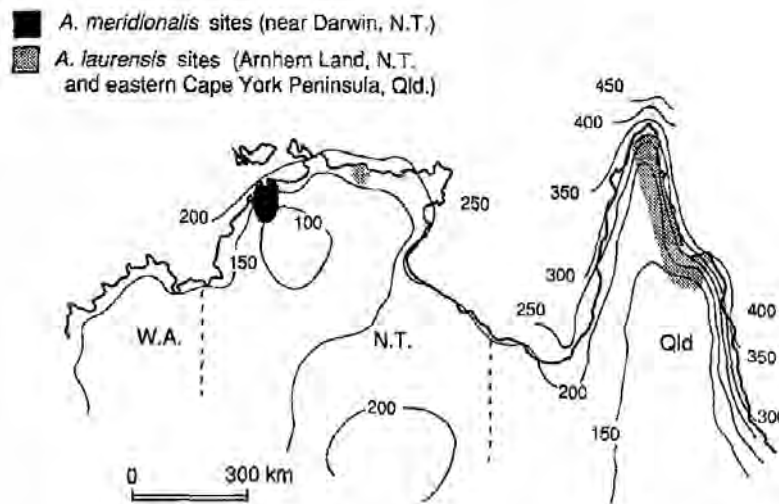


Figura 5.8: Velocidad promedio del viento (Km/día) para el área de estudio (Julio – 9:00am). Se observa que las termitas *A. Laurensis* estudiadas en Cape York están expuestas a mayores vientos y nublados, por lo que es consistente con la hipótesis de buscar mantener las ganancias por radiación en la fachada este. Fuente: Jacklyn, 1992.

Esta investigación presenta la hipótesis que la fachada este, debe mantener una temperatura constante por las mañanas y supone que esto debe tener un beneficio para las termitas. Judith Korb por su parte, mantiene la hipótesis de la fachada este en un estudio posterior y examina la influencia que tiene esta en el comportamiento de los habitantes (J. Korb, 2003).

Aplicando un método no destructivo J. Korb estudió el patrón de distribución de las termitas dentro del montículo, utilizando un equipo basado en microondas que permite detectar el movimiento a través de objeto sólidos.

Los resultados fueron consistentes con la hipótesis de la importancia de la temperatura estable para la fachada este. Ya que las termitas se concentraron por la mañana en esta cara, sin embargo este patrón no se repitió ni al amanecer ni al medio día. Lo cual la lleva a suponer que podría indicar que solo el calentamiento por la mañana de la cara este es importante para las termitas.

Reporta que éste es un patrón diario que se presenta en otros insectos sociales, que orientan sus nidos para calentar más rápido por la mañana después de estar expuestos a noches frías.

Jacklyn trata de explicar el porqué de la orientación y de sus variaciones, pero mantiene la pregunta inicial, Porque la forma alargada de estos montículos. J. Korb propone una explicación general para las características de la arquitectura de los montículos.

a) La forma alargada de los montículos responde a una adaptación a la temporada de lluvias y la inundación del sitio. La hipótesis es que esta forma permite interactuar con el viento para evaporar de forma más rápida la estructura, que durante la época de lluvias podría verse comprometida. Permite mantener seco el almacén interno de alimento (pastos) y facilita la respiración del montículo que ve disminuida su porosidad al compactarse con el aumento de humedad.

b) La orientación norte-sur es probable que busque conseguir una característica térmica dado que su forma los vuelve más vulnerables a interactuar con condiciones ambientales (temperatura del aire y radiación) debido a su relación superficie/volumen.

c) Las variaciones en la orientación se explican como una adaptación a las condiciones locales (sombreado y viento). Para asegurar niveles de temperatura en la fachada este por las mañanas, cuando las condiciones térmicas no son las idóneas. Por lo que las termitas aprovechan estas condiciones al trasladarse a la cara este del montículo (Korb, 2003).

IV. Interpretación bioclimática.

Considerando que el clima local es cálido húmedo resultaría fácil definir como la estrategia principal el uso de la ventilación para disminuir la temperatura y la humedad. Sin embargo los parámetros de confort son distintos, según reportan los estudios citados anteriormente estaría alrededor de los 29° y 32° C. Por lo que el uso de la orientación, en este caso parece más determinado por la forma de la estructura y su búsqueda de interactuar con los vientos locales, para disipar humedad y no tanto temperatura.

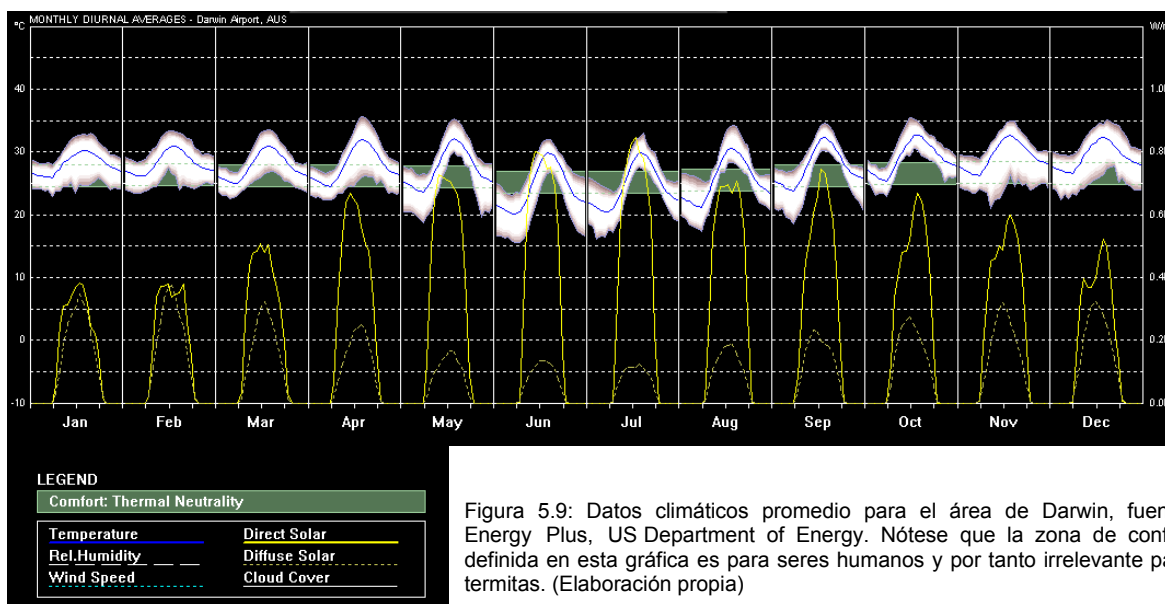


Figura 5.9: Datos climáticos promedio para el área de Darwin, fuente: Energy Plus, US Department of Energy. Nótese que la zona de confort definida en esta gráfica es para seres humanos y por tanto irrelevante para termitas. (Elaboración propia)

Se observa en los datos climáticos que la temperatura promedio mensual de Mayo a Agosto son menores y es donde se presentan las temperaturas mínimas extremas, por lo que una variación en la orientación tendría una influencia en la cantidad de radiación recibida por la estructura durante estos meses debido al ángulo de incidencia y menor en los meses de Noviembre a Diciembre.

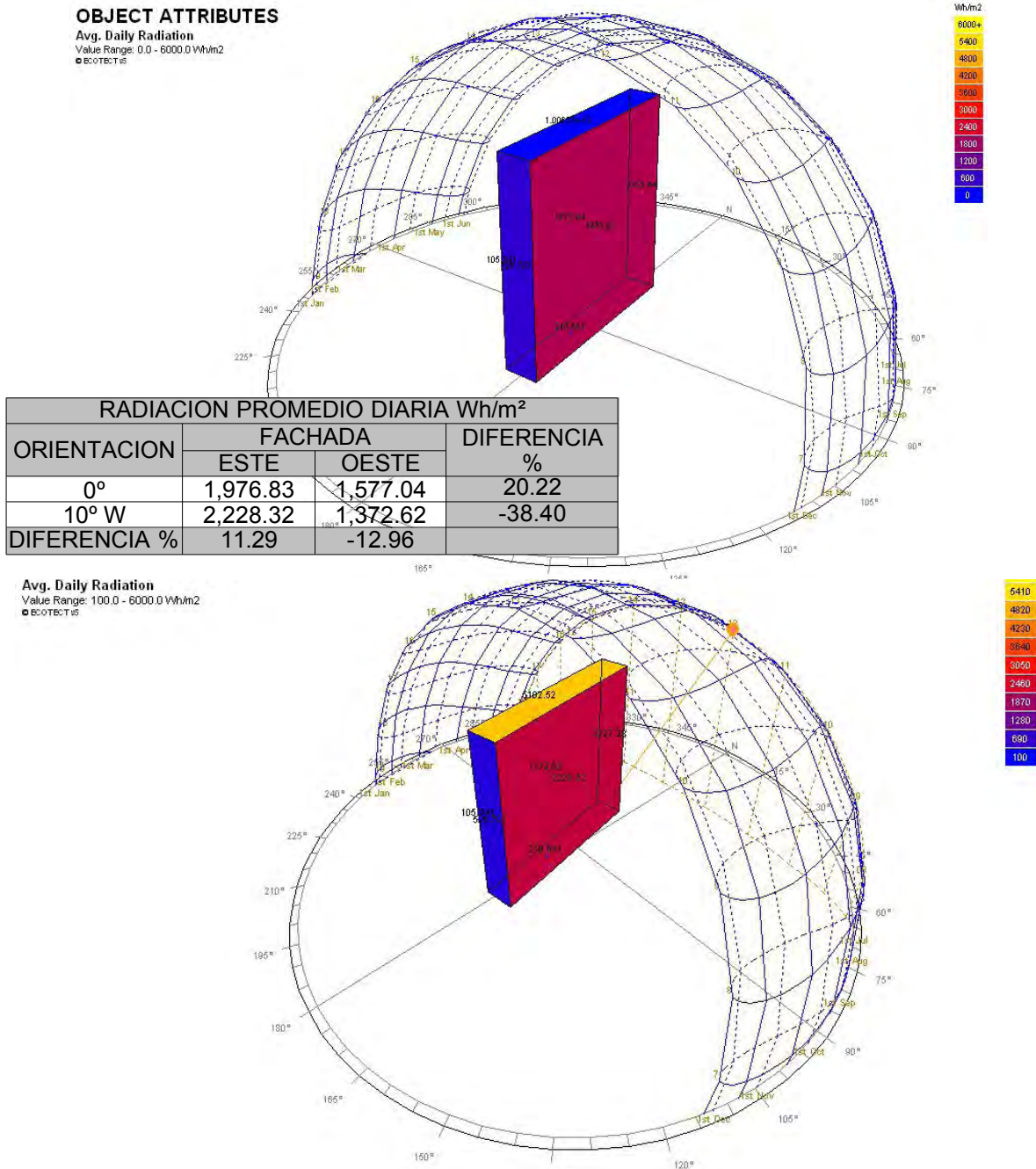


Figura 5.10: Radiación diaria promedio, evaluada con los datos de radiación del área de Darwin. Fuente: Energy Plus, US Department of energy. Se evaluó la radiación diaria promedio recibida en dos estructuras, la primera con una orientación norte – sur y la otra con una rotación de 10° hacia el oeste. La radiación sobre la cara este fue 11% mayor en el ejemplo girado en comparación con el no girado. (Elaboración propia)

La hipótesis de la variación en la orientación como respuesta a las condiciones de sombreado o viento parece sostenerse con los datos de clima que presenta el estudio, aunque no presenta datos normalizados. La preferencia en mantener una temperatura estable para la cara este, es probablemente la parte más débil de la hipótesis, sin embargo los datos de ocupación presentados la refuerzan.

Pogonomyrmex occidentalis.



Figura 5.11: Nido de *Pogonomyrmex occidentalis*. Fuente: <http://museumdev.colorado.edu>

La hormiga *Pogonomyrmex occidentalis* habita zonas desérticas, como las de el estado de Sonora (Alatorre-Bracamontes y Vásquez-Bolaños, 2010) presentan una estrategia similar a la de las termitas anteriormente descrita.

Según reporta Blaine J. Cole en la zona de Fruita, Colorado, las hormigas forrajeras de esta especie construyen nidos de tierra cónicos orientados de tal forma que la pendiente más alargada queda hacia el sureste para calentarse con el sol de la mañana. De igual forma que la *A. laurensis* estas hormigas tienden a ocupar la parte sur y este del nido, mientras que la parte oeste esta desocupada.

Debido a la forma, a la orientación y al material con el que se construyen este tipo de nidos presenta una estrategia térmica estratificada. Según lo describe B.J. Cole el nido consiste en una serie de túneles que esta coronado con un montículo cónico que esta cubierto de piedras. La temperatura es mayor en la parte superior del cono y va descendiendo en círculos concéntricos hacia la base, aunque marcadamente hacia la parte este y sur (B.J. Cole, 1994).

En síntesis es claro el uso de estrategias propias de la bioclimática, la orientación con fines térmicos o de ventilación, la adecuación a las condiciones locales como viento o nubosidad y la ocupación de locales en relación a los requerimientos de confort.

5.2.- Ventilación.

I. Ventilación en la arquitectura.

El viento como estrategia de diseño tiene dos principales usos, formar parte de la climatización pasiva del espacio y la renovación del aire interior. En el primer caso la ventilación se usa para disipar calor en situaciones donde la temperatura se encuentra por encima de los rangos de confort. La carta bioclimática de Olgay muestra como puede mantenerse una temperatura adecuada utilizando el viento a cierta velocidad y a ciertas temperaturas y porcentajes de humedad.

La Carta psicrométrica de Givoni también define una una área donde es posible utilizar la ventilación como estrategia pasiva de climatización. Otra herramienta de la bioclimática donde se incluye el viento es la gráfica de temperatura efectiva corregida (TEC) donde puede verse que el viento Interactúa con variables como la temperatura radiante o de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo y la velocidad del viento (ASHVE, 1932. Vernon, 1932. Bedford, 1940).

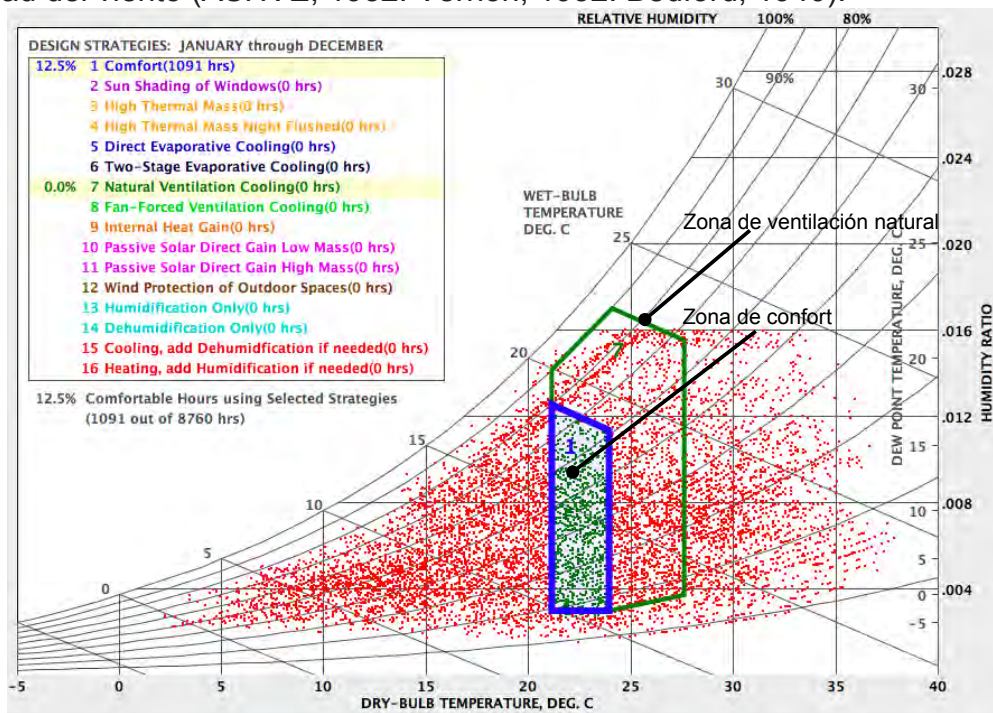


Figura 5.12: Carta psicrométrica para el área de Omatjete, Namibia, Fuente: Archivo de clima generado en Meteonorm y analizado en Climate Consultant 5.4. (Elaboración propia)

La renovación del aire interior depende de la calidad de éste, en áreas urbanas usualmente el aire contiene una variedad de contaminantes como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono (O₃). Usualmente el deterioro de la calidad del aire es debido principalmente al aumento del bióxido de carbono (CO₂) producido por la oxidación celular, por lo que es necesario el remplazo del aire interno (García Chávez y Fuentes Freixanet, 2005).

En la interacción del viento con edificaciones hay que considerar tres principios. El primero el gradiente de velocidad debido a la fricción con el terreno. La velocidad del viento medida a ras de suelo siempre es menor que si se mide a mayor altura.

El segundo es que debido a la inercia, el viento tiende a desplazarse manteniendo su misma dirección cuando choca con alguna obstrucción, rodeando su superficie para continuar así con su dirección original.

El tercero es que el viento viaja de zonas de alta presión a zonas de baja presión. Los vientos a menor temperatura se encuentra a mayor presión debido a que sus partículas se encuentran más juntas mientras que a mayor temperatura las partículas se expanden y se encuentran a menor presión.

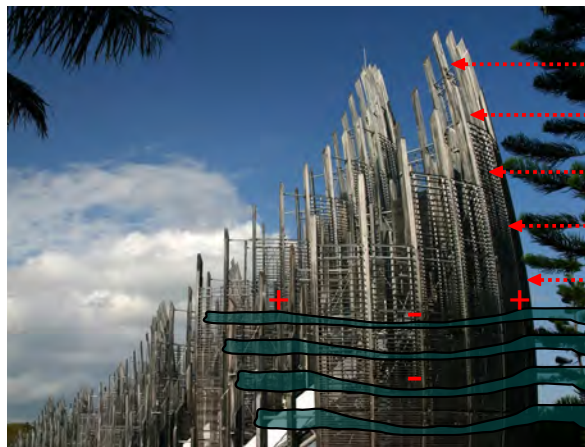


Figura 5.13: Centro cultural Jean-Marie Tjibaou Renzo Piano, Imagen base: www.mimoo.eu

Así como el viento se desplaza debido a la presión también se ve afectado por la temperatura, los movimientos convectivos se presentan por gradientes de presión y también por diferencia de temperatura, el viento tiende a desplazarse de áreas de mayor temperatura a una menor.

El viento interactúa con condiciones regionales y locales, cuando se ve afectado por las condiciones locales del sitio, es decir los microclimas compuestos por varios factores como áreas de sombreado, áreas soleadas, cuerpos de agua, variaciones en la topografía, obstrucciones artificiales o naturales, afectan de manera relevante la velocidad y dirección del viento. Es así que se presentan efectos de vientos de valle, brisas, terrales, etc.

Cuando el viento interactúa con una obstrucción como lo es un edificio se crean áreas de alta presión y áreas de baja presión, de igual forma la velocidad del viento se modifica en estas situaciones, usualmente en las caras laterales del objeto se crean áreas donde se acelera la velocidad (Brown, G. Z., 1985).

II. Ventilación en la arquitectura animal.

ORGANISMO	ESPECIE	ESTRATEGIA	UBICACIÓN	CLIMA
Termita	<i>Macrotermes michaelseni</i>	Ventilación	Namibia	Cálido seco



Figura 5.14: Montículo de *Macrotermes michaelseni*. Fuente: Grohmann, 2010

La especie *Macrotermes michaelseni* es una termita de la sabana Africana que habita zonas semi áridas como las existente en el norte de Namibia. Estas termitas construyen montículos que funcionan como un dispositivo de ventilación que aprovecha la energía del viento para renovar la calidad del aire interior.

Los montículos de la *M. michaelseni* es uno de los ejemplos más conocidos de construcciones animales en la arquitectura, donde se ha tratado de emular sus estrategias de ventilación y termoregulación. El Eastgate Centre en Harare, Zimbabwe es un edificio de comercios y oficinas que fue diseñado en los años noventa e inspirado en el modelo de funcionamiento que se pensaba que utilizaban los montículos de las termitas en esos años.



Figura 5.15: Eastgate Center, Harare, Zimbabwe. Fuente: wikipedia

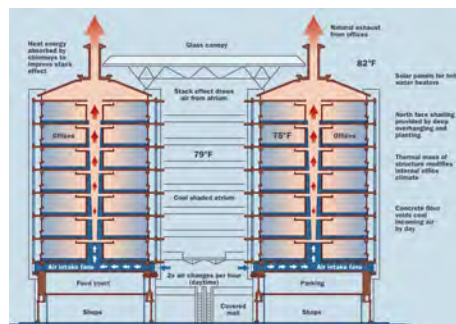


Figura 5.16: Ventilación Eastgate Center. Fuente: <http://ehp.niehs.nih.gov/>

El modelo de funcionamiento de los montículos de termitas fue propuesto inicialmente en los años sesenta y se mantuvo hasta finalizado el siglo XX. De este se desprenden dos principios fundamentales.

Mecanismo de termosifón: El calor generado por el nido promueve que el montículo funcione como un circuito vertical por donde viaja el aire debido al movimiento convectivo, eventualmente el aire es disipado por la superficie porosa del montículo, este mecanismo se pensó que era el utilizado por los montículos que no poseen una abertura superior.

Mecanismo por ventilación forzada: Este mecanismo fue propuesto para los montículos que poseen una abertura superior, en estos casos el diferencial de presión ejercido por el viento en la base y la parte superior del montículo produce el flujo de aire fresco desde el basamento refrescando el nido y su posterior salida por la chimenea central. (Hansell, 2007)

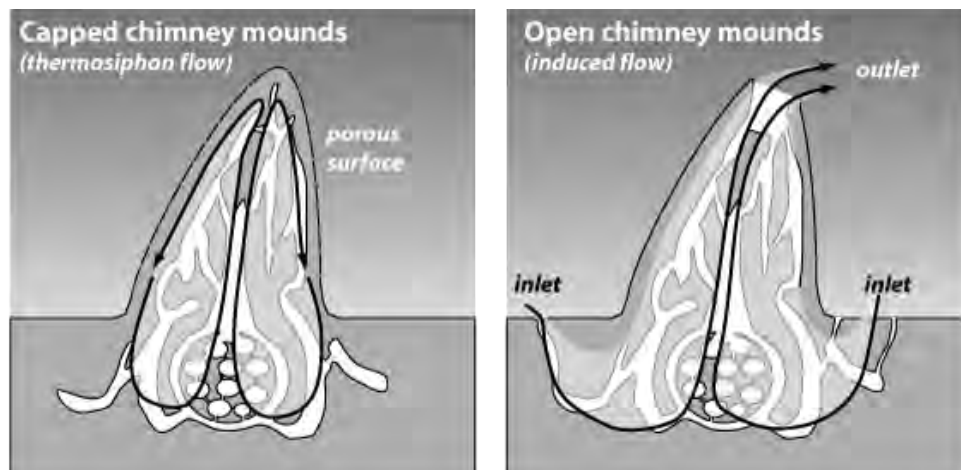


Figura 5.17: Modelos de ventilación de los montículos, flujo de termosifón (izq.) y modelo de ventilación forzada. Fuente: Turner, 2008.

Las investigaciones recientes proponen un modelo más complejo en el que el montículo, los conductos internos y el nido subterráneo interactúan como un sistema similar a los pulmones donde la ventilación es solo una fase del proceso. Es en sí un intercambiador de gases activo (O_2 y CO_2) donde se presentan varias fases (Turner y Soar, 2008).

Según las investigaciones de Scott Turner, en las construcciones de las termitas y nuestros pulmones se dan por lo menos tres mecanismos similares de intercambio de gases. El primero (**1a Fase**), un flujo mayor de aire a través de las vías superiores (la tráquea y los bronquios), es impulsado por los músculos del pecho, aquí el intercambio de gases es principalmente convectivo. El último (**3a Fase**) se da en los espacios finales de aire de los pulmones (alveolos) aquí el intercambio de gases es un flujo muy pequeño, es principalmente por difusión.

Entre los dos extremos anteriores se encuentra una fase intermedia (**2a Fase**), donde la difusión y la convección tienen una importancia relativamente similar. Esta es una fase de régimen mixto, es decir entre una fase difusiva y convectiva. Para entender como es que el montículo funciona de una manera similar, hay que profundizar en la arquitectura del nido, el montículo y en las fases de ventilación.

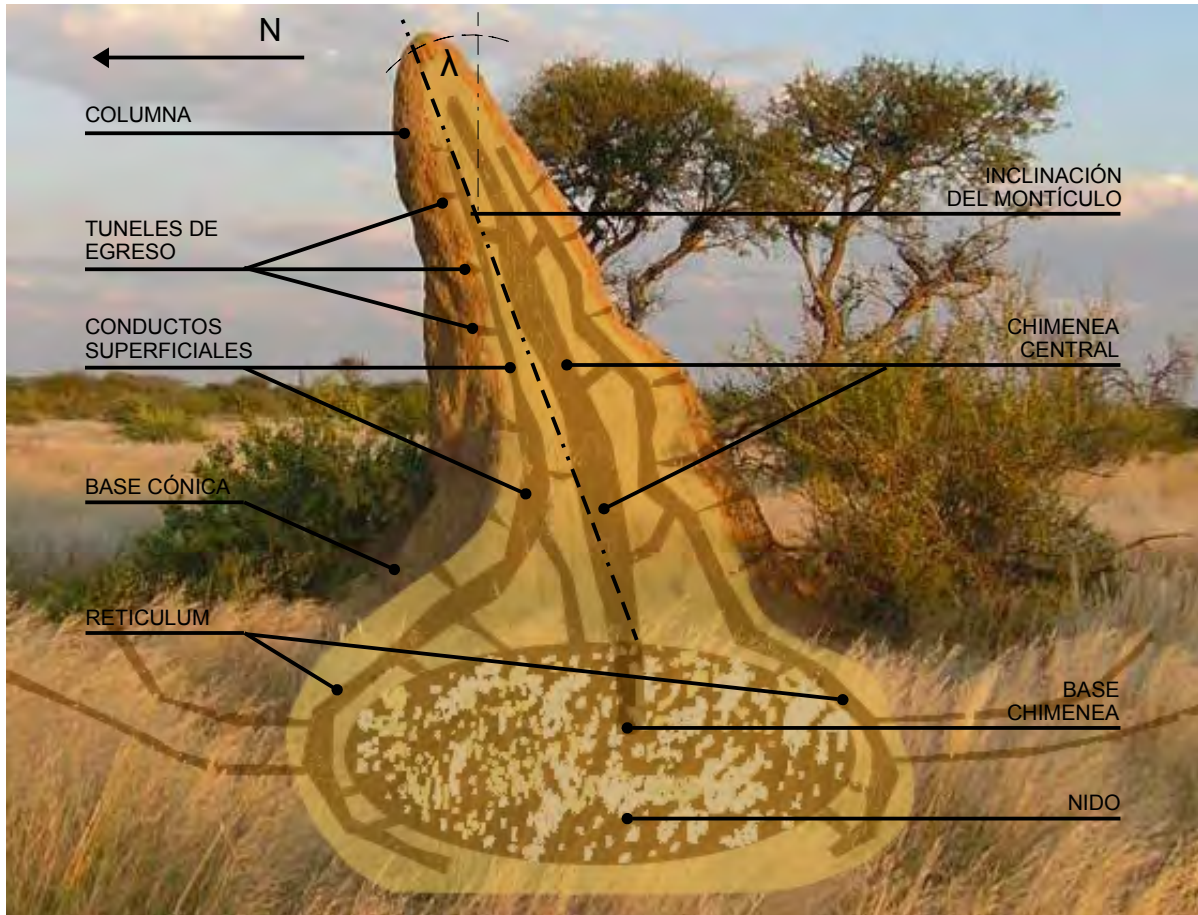


Figura 5.18: Arquitectura del montículo según Scott Turner. Imagen base: Grohmann, 2010.

III. Arquitectura del montículo y el nido:

a) **Montículo (1a Fase de ventilación)**, es la estructura que sobresale del terreno y está formado por las siguientes estructuras:

Columna: Estructura porosa con una altura 3 hasta 9 m, usualmente con una inclinación hacia el norte que coincide con la latitud del sitio.

Base cónica y basamento: La base de altura 1.5 m y 4 a 5 m de diámetro. El basamento tiene un diámetro de 10 a 20 m de tierra erosionada del montículo.

Túneles de egreso: Ductos superficiales que pueden cubrir todo el perímetro del montículo, responsables de la alta porosidad de la estructura.

Conductos superficiales: Se conectan a los túneles de egreso y corren verticalmente por la superficie exterior del montículo hasta llegar al fondo rodeando el nido. Junto con los túneles de egreso forman la primer fase de intercambio de gases, aquí el aire es empujado rápidamente por la fuerza del viento al interior del montículo. Los vientos al interior son alta frecuencia debido a la turbulencia y a la velocidad, ventilación por convección forzada principalmente.

Chimenea central: Conducto amorfo que corre verticalmente a casi a toda la altura del montículo, inicia en el nido con el cual se conecta a través de pequeños túneles.

Reticulum: Está formado por los conductos superficiales en su parte más profunda, cuando rodean y abrazan al nido, el cual solo es visible detrás del reticulum. Régimen mixto de ventilación, convección y difusión del aire, vientos de frecuencia media (**2a Fase de ventilación – intermedia**).

b) **Nido (3a Fase de ventilación):** El nido es subterráneo, aproximadamente 1m por debajo de la superficie. Esta formado por numerosas cámaras que contienen celdas con hongos con los que las termitas mantienen una relación simbiótica. Estos hongos ayudan a descomponer los forrajes y corteza transformándolos en un alimento enriquecido para las termitas.

Las cámaras del nido están separadas por pequeños ductos horizontales de 2 a 3mm de diámetro, donde el aire se estanca y mezcla muy poco. El aire en el nido, la parte subterránea de la chimenea y los ductos horizontales se encuentra a muy baja velocidad y a baja frecuencia, aquí el intercambio de gases es en pequeños volúmenes por difusión.

En la arquitectura y fases de ventilación descritas anteriormente se observa un régimen mixto (convección - difusión) similar a los pulmones, donde el aire de las partes subterráneas del nido y las partes superiores se mezcla mediante una fase intermedia (Turner y Soar, 2008).

IV. Fases de ventilación.

1a Fase – Gradientes de presión e interacción con vientos turbulentos.

Según explica Turner la ventilación entre el montículo y el exterior se da debido a a gradientes de presión y la interacción del montículo con los vientos turbulentos, los cuales son los más comunes en la naturaleza, dada la alta variación en velocidad y orientación.

a) **Gradiente de presión:** La velocidad del viento se incrementa con la altura, debido a que las capas más bajas se friccionan con la topografía, así que conforme aumenta la altura del montículo la presión que ejerce el aire en la parte superior es mayor en comparación con la base.

Debido a la forma circular y porosidad del montículo el viento a pesar de ser errático en cuanto a su dirección y velocidad es seguro que presente una mayor presión en la cara de barlovento y una menor en la cara opuesta. Creándose áreas de presión al frente y áreas de succión en la partes laterales y posteriores.

Ya que la presión es mayor en la parte superior el aire tenderá a viajar a la parte baja donde se encuentra a menor presión, donde será succionado hacia la parte superior una vez más debido a la diferencia de presión con la cara en sotavento.



Figura 5.19: Distribución de la presión ejercida sobre el montículo según Turner. Imagen base: Grohmann, 2010.

Esta interacción del montículo con el viento provoca el ingreso de altos volúmenes de aire dentro de la estructura, en particular en los conductos superficiales. Si el montículo requiere de capturar mayor energía para ventilar adecuadamente el nido es posible aumentar la altura de la columna, según reporta Turner es común encontrar montículos más altos en zonas boscosas que en áreas abiertas.

b) Montículo como filtro de los vientos turbulentos: El montículo es la principal interfaz entre el nido y el medio ambiente, en particular con el viento. El modelo propuesto originalmente de funcionamiento del montículo dio pie a interpretaciones arquitectónicas basadas en una idealización del viento, en cuanto a una dirección y velocidad constantes y predecibles.

Sin embargo el viento en la naturaleza es caótico, la variación de la velocidad del viento en el tiempo produce que haya variaciones en la frecuencia de los mismos.

Los vientos turbulentos contienen un amplio espectro de frecuencias, desde las frecuencias altas para vientos a mayor velocidad, frecuencias medias para vientos de velocidad moderada y frecuencias bajas para vientos que varían poco en el tiempo. Los vientos turbulentos contienen rangos mayores de altas frecuencias, mientras que los vientos más estables contienen rangos mayores de bajas frecuencias.

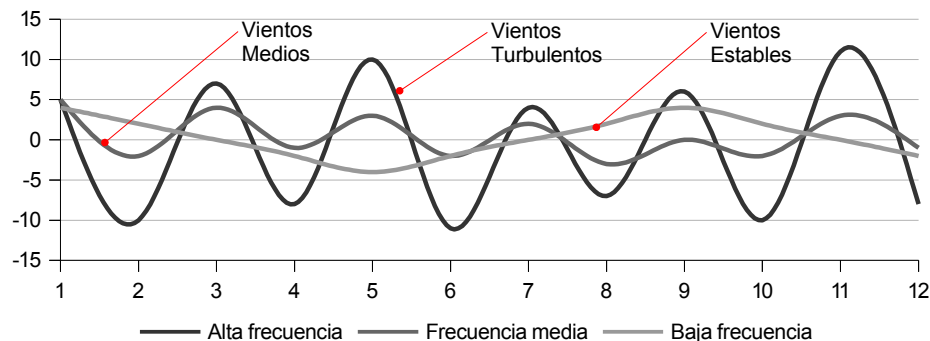


Figura 5.20: Tabla de distintas frecuencias. La frecuencia (Hz) es la tasa de repetición de un fenómeno por unidad de tiempo (s), se puede estimar dividiendo la velocidad(m/s) entre la longitud de onda (m) $f=v/\lambda$. La longitud de onda es la distancia entre dos pulsos del fenómeno, ósea la distancia horizontal entre cresta y cresta. A mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa. (Elaboración propia)

Según lo demuestran las investigaciones de Turner la red de túneles interiores del montículo filtran ciertas frecuencias del espectro de los vientos turbulentos, dejando pasar la frecuencias bajas y amortiguando o bloqueando las frecuencias altas.

Así los vientos turbulentos ingresan al montículo a alta frecuencia y a mayor velocidad, a través de los túneles de egreso y los conductos superficiales. Conforme se adentran en el montículo se ven amortiguados en su velocidad y su frecuencia hasta llegar al nido y a la chimenea central donde el aire se estanca y se encuentra a muy baja frecuencia.

Es así que según Scott Turner el montículo funciona como un filtro de paso bajo para la energía caótica de los vientos turbulentos, al permitir solo el paso de frecuencias bajas y bloquear o amortiguar las altas.

3a Fase - Final.

Una de las principales debilidades en el modelo de funcionamiento propuesto originalmente, es que asume que la ventilación del montículo incluye también la ventilación del nido. Según mediciones posteriores el aire del montículo rara vez se mezcla con el aire del nido (Turner y Soar, 2008).



Figura 5.21: Filtrado de frecuencias dentro de el montículo según Turner. Imagen base: Grohmann, 2010.

La ventilación dentro del nido se da en pequeños volúmenes a baja frecuencia y velocidad, debido a que los conductos son pequeños, de forma horizontal y a que los vientos provenientes de la parte superior se han amortiguado. Por otro lado Turner reporta que la temperatura del nido es usualmente menor a la del montículo debido a que se encuentre enterrado y a que la generación de calor metabólico de la colonia es pequeño por lo que descarta el mecanismo de termosifón (Turner y Soar, 2008).

2a Fase (intermedia) - Movimiento pendular y mezcla acústica del aire.

La mezcla del aire del nido con el del montículo se explica debido a una fase intermedia donde según Turner se presentan dos mecanismos, una diferencia de frecuencias de las dos capas y la resonancia acústica de los ductos.

Como ya se mencionó el aire en el nido y la chimenea en su parte más profunda se encuentra casi quieto y a muy baja frecuencia (3a Fase), sin embargo el aire que contienen los ductos superficiales al llegar a las partes bajas y abrazar el nido (reticulum) se reportan a una frecuencia media (Turner y Soar, 2008).

Es así que la capa intermedia entre el aire del montículo y el del nido se encuentran diferencialmente perturbadas desde la periferia hacia el centro, ocasionalmente estas diferentes perturbaciones provocan un movimiento pendular del aire creando una burbuja que mezcla ambas capas.

Este movimiento del aire se conoce como pendular ya que literalmente el aire oscila pendularmente de un lado al otro hasta crear una burbuja que alcanza a pasar de abajo hacia arriba. Este movimiento se presenta también en los pulmones en las ultimas partes de los conductos respiratorios (Turner y Soar, 2008).

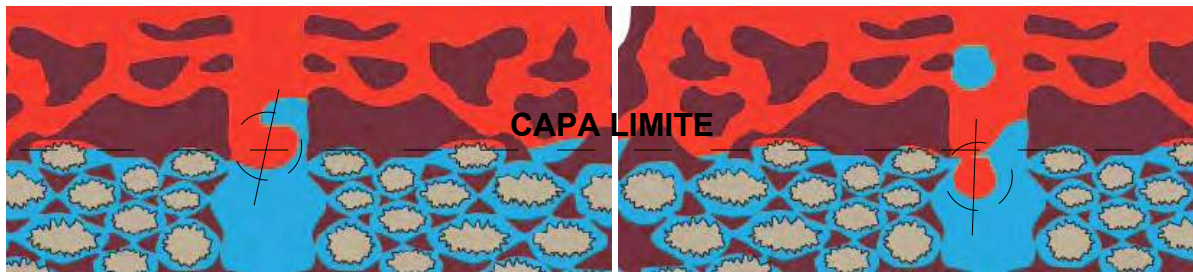


Figura 5.22: Intercambio de aire entre el montículo y el nido mediante un movimiento pendular, según Turner. Fuente: <http://www.esf.edu/efb/turner/termitePages/termiteGasex4.html>

El segundo mecanismo que permite la mezcla de aire entre el nido y el montículo, es aún más interesante, esta basado en el fenómeno de la resonancia. Según Turner los conductos superficiales del montículo puede tener 3 m de largo y resonar a frecuencias de 20 a 30 Hz, lo cual entra en el rango de frecuencia de los vientos turbulentos que están entre 1 y 100 Hz.

Si se tiene una mezcla de aire estratificada en un tubo cerrado y esta se hace resonar mediante una frecuencia determinada se promueve la mezcla de los gases, se le conoce como mezcla acústica. Scott Turner propone que los túneles del montículo están sintonizados para resonar al interactuar con las frecuencias de los vientos turbulentos y promover así el intercambio de gases entre el nido y el montículo.

En conclusión las investigaciones de Scott Turner renovaron el modelo original de ventilación del nido. Al compararlo con el funcionamiento de los pulmones descubrió que las partes altas del montículo se intercambian mayores flujos de aire debido a la interacción con los vientos turbulentos, al diferencial de presión entre las caras y la porosidad del montículo (1a Fase).

En contraste las partes bajas donde se encuentra la frontera entre el aire del montículo y el del nido los flujos de aire entre ellas, son muy pequeños. Este flujo entre las dos capas de aire se da de igual forma que en los pulmones, por un movimiento pendular y principalmente por una mezcla acústica promovida por la resonancia de los ductos a ciertas frecuencias (2a Fase - intermedia).

V. Interpretación bioclimática.

El clima en Namibia es principalmente cálido seco con temporada de lluvias en los meses de Octubre a Abril. La humedad relativa oscila entre el 30% y el 60%. Dado que se encuentra en el hemisferio sur el invierno se presenta de Junio a Agosto que es donde se presentan las menores temperaturas. En Junio y Julio la temperatura de bulbo seco es en promedio de 15°C y de Octubre a Enero esta en 26°C.

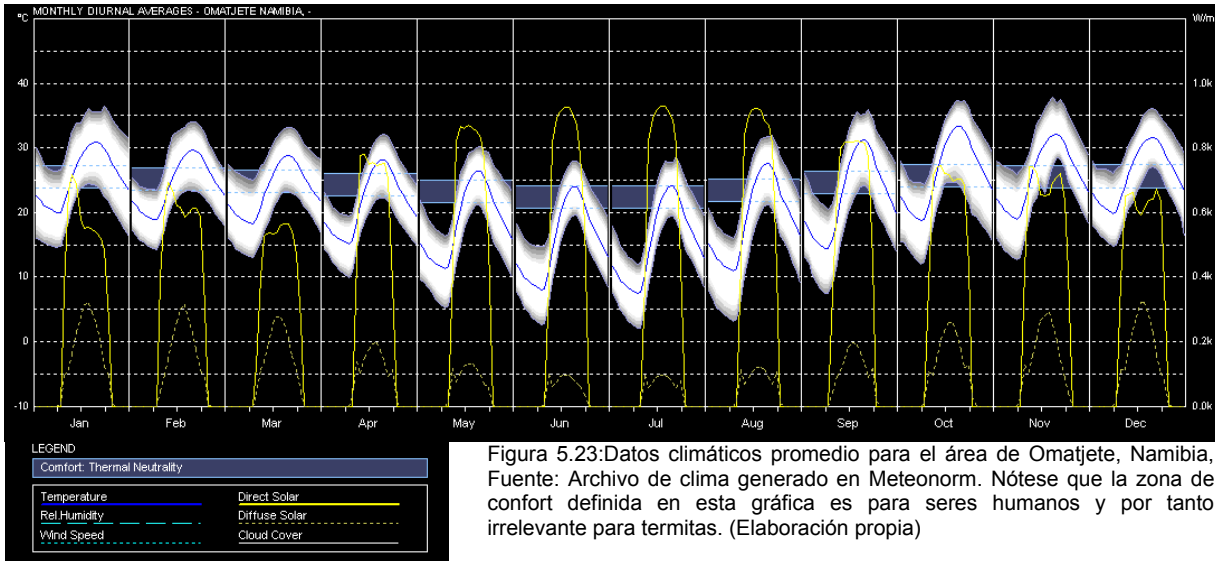


Figura 5.23: Datos climáticos promedio para el área de Omatjete, Namibia, Fuente: Archivo de clima generado en Meteornorm. Nótese que la zona de confort definida en esta gráfica es para seres humanos y por tanto irrelevante para termitas. (Elaboración propia)

En los climas cálidos secos la falta de humedad en el aire provoca una mayor oscilación térmica, en la gráfica siguiente la variación entre la temperatura mínima y la máxima es alrededor de 10°C para los meses con lluvia, en contraste los meses de invierno donde la precipitación es menor la oscilación es de más de 15°C.

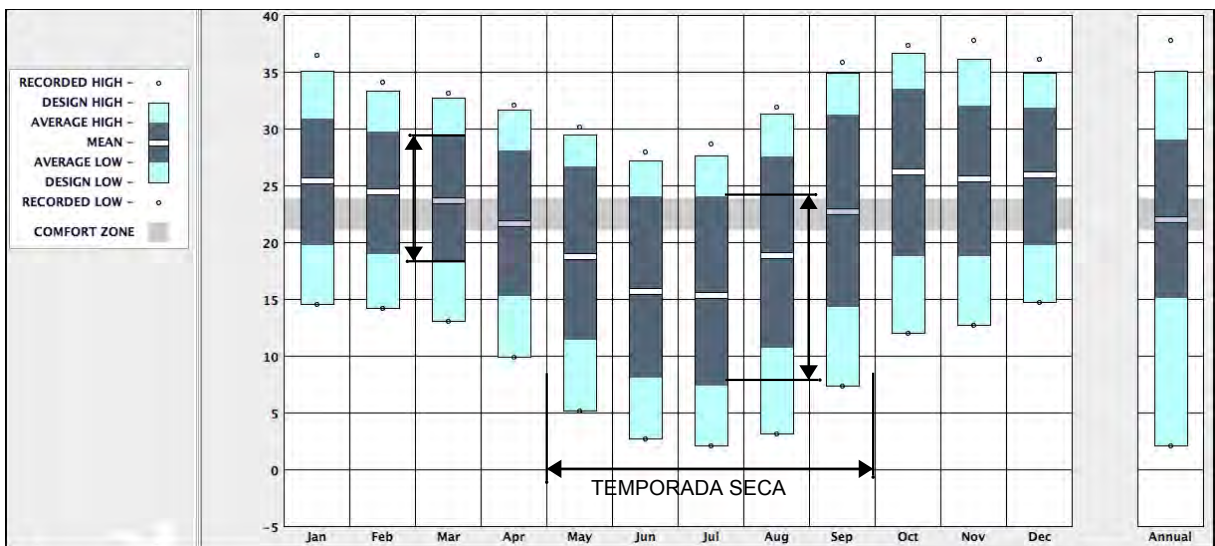


Figura 5.24: Temperatura promedio para el área de Omatjete, Namibia, Fuente: Archivo de clima generado en Meteornorm y analizado en Climate Consultant 5.4.

Se ha señalado en algunas publicaciones que los nidos de termitas son muy eficientes en mantener una temperatura estable a pesar de la alta oscilación térmica, sin embargo como señala Turner no hay evidencia de que las termitas regulen la temperatura interior del nido. En contraste muestra evidencia de que sí hay amortiguamiento en la oscilación diaria de la temperatura debido al efecto de masa térmica del nido, pero la temperatura interior anual presenta una oscilación mayor de 15°C. Rango que es muy cercano a la temperatura del suelo a 1m de profundidad.

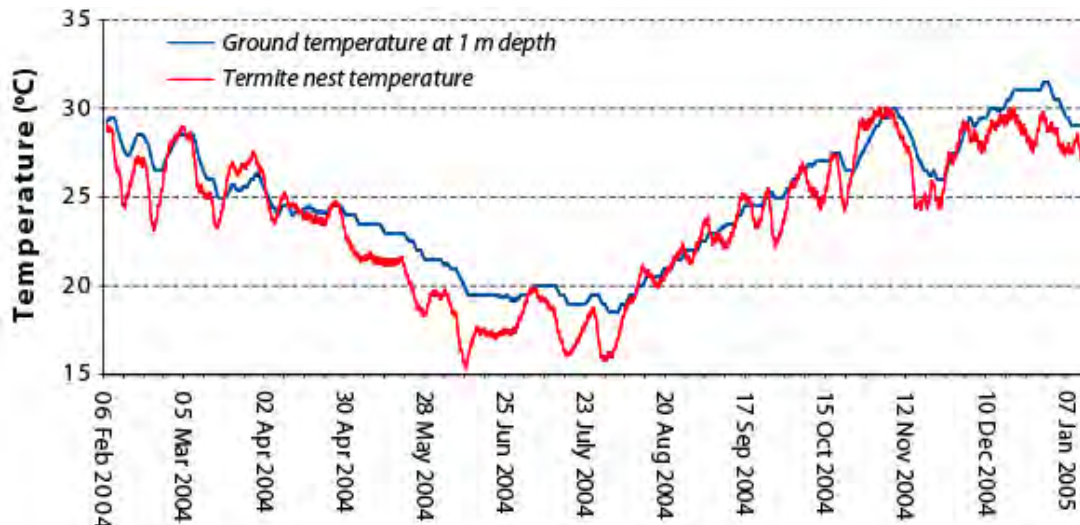


Figura 5.25: Gráfica de temperatura del nido de *Macrotermes michaelseni* en Namibia y temperatura del suelo a 1 metro de profundidad. Se observa que la variación de la temperatura anual del nido tiene una oscilación térmica considerable. Fuente: Turner and Soar 2008.

Es probable que el objetivo principal de la estrategia de ventilación de los montículos de *Macrotermes michaelseni* sea para renovar el aire interior del nido y no para mantener una temperatura específica.

De cualquier forma los modelos de ventilación del nido en conjunción con el montículo, no solo muestran estrategias utilizadas en la bioclimática, como el gradiente de presión, sino que presentan mecanismos basados en el aprovechamiento de vientos turbulentos que no se han explorado en la arquitectura.



Figura 5.26: Captador de viento, Irán, Fuente: Wikipedia. Y modelo tridimensional de un montículo *Macrotermes michaelseni* con inclinación Norte de 20° y 3m de h, para evaluar el gradiente de presión. (Elaboración propia)

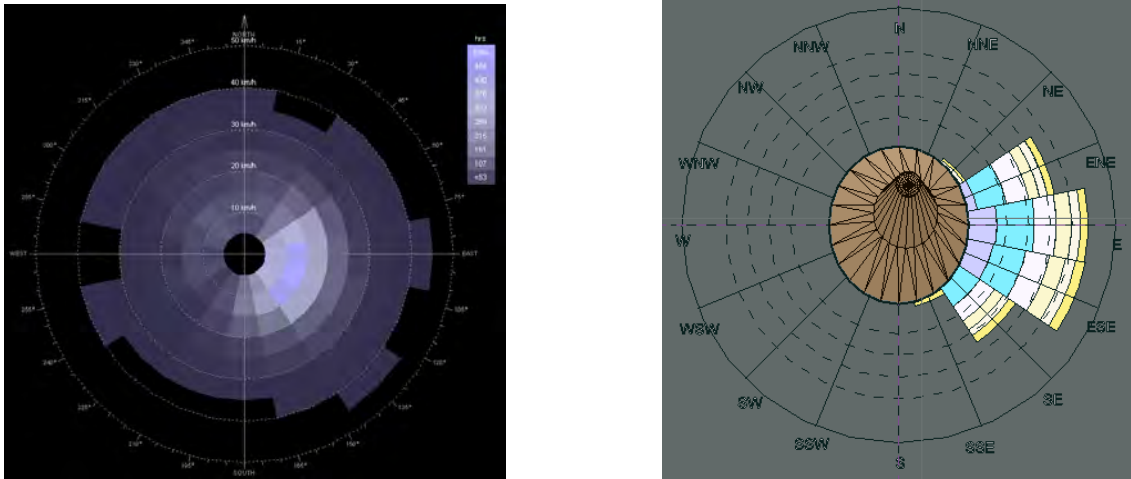


Figura 5.27: Rosa de los vientos para Omatjete, Namibia. Archivo de clima generado en Meteonorm. Vientos dominantes del Este y modelo tridimensional del montículo para evaluar gradiente de presión. (Elaboración propia)

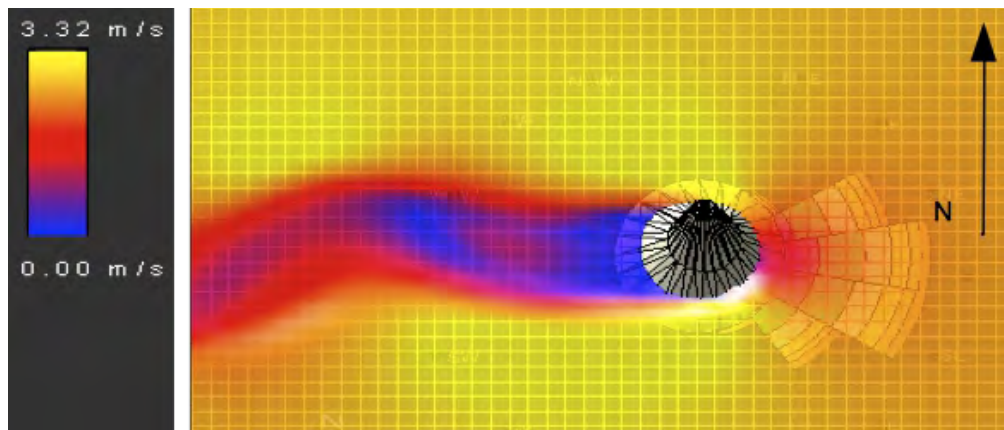


Figura 5.28: Sombra del viento generada por el montículo, para una velocidad de viento de 2.5m/s desde el Este. Análisis generado en Autodesk Vasari Beta 3.0. a una altura de 0.80m. (Elaboración propia)

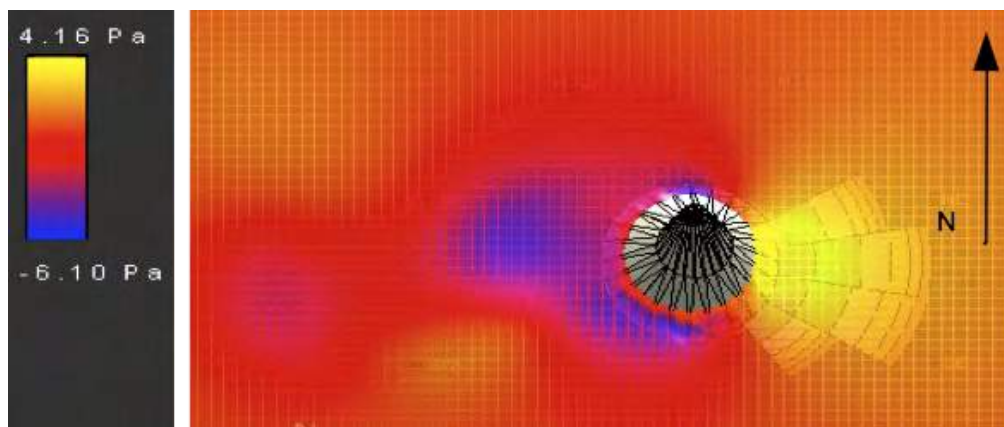


Figura 5.29: Gradiente de presión generada por la oposición que presenta el montículo al paso del viento, para una velocidad de viento de 2.5m/s desde el Este. Análisis generado en Autodesk Vasari Beta 3.0. a una altura de 0.80m. Se observa que la cara Este se encuentra a mayor presión en comparación a las caras Sur y a las laterales. (Elaboración propia)

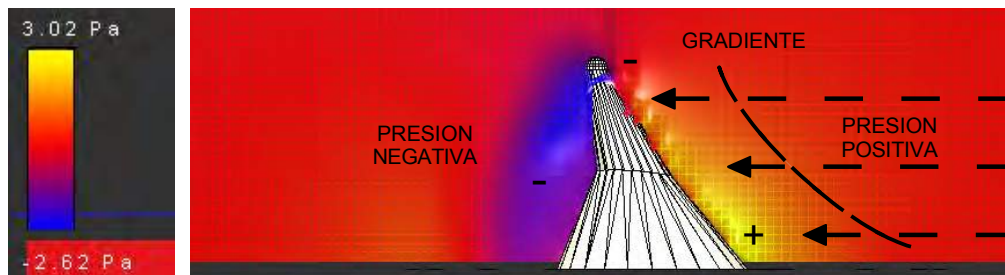


Figura 5.30: Gradiente de presión vertical generada por la oposición que presenta el montículo al paso del viento, para una velocidad de viento de 2.5m/s. Se observa como en la base del montículo existe una presión aproximada de 3.02 Pa, mientras que llegando a la parte superior la presión ha disminuido. Análisis generado en Autodesk Vasari Beta 3.0. (Elaboración propia)

La utilización de las estrategias de los montículos aquí descritos en el diseño arquitectónico puede generar ideas en cuanto a fachadas porosas en combinación con gradientes de presión generados por el viento.

Es común en la arquitectura diseñar la ventilación considerando una orientación fija para la captación del viento, en el mejor de los casos se considera un rango de orientación cuando que las variaciones en la velocidad y dirección del viento son considerables y por tanto las orientaciones fijas o estrechas para captar su energía resultan poco fiables o ineficientes.

La forma circular y alta porosidad del montículo permite una orientación completa y generar diferencias de presión en todas direcciones para ventilar. De igual forma el aumento en altura aprovecha un gradiente de presión vertical, por lo que se presenta como una estrategia mucho más eficiente que las orientaciones fijas.

Sin embargo la estrategia más novedosa sería la utilización de la resonancia acústica para renovar el aire interior. En particular aprovechando la variedad de rangos de frecuencia que presentan los vientos turbulentos filtrándolos de tal manera que produzcan el intercambio de aire.

Por otro lado en los estudios del mismo Scott Turner se menciona que ha diferencia de la temperatura, la regulación de la humedad al interior del nido es clara. Esto se observa en las variaciones de humedad propias de las zonas que habita esta especie. Las lluvias son muy marcadas durante el verano en contraste con el invierno donde los niveles de humedad bajan considerablemente. Sin embargo las mediciones de humedad de las muestras de tierra tomadas en el nido y el montículo fueron muy constantes (Turner et al., 2006).

El flujo de humedad se da por el movimiento de tierras adyacentes, humedecidas por las lluvias, hacia interior del nido o desde zonas subterráneas con mayor humedad. Otra desde el nido hacia la superficie del montículo, como reconstrucción continua, la cual contiene humedad añadida por la saliva de los constructores (Turner et al., 2006). No se menciona en los estudios pero éste último proceso podría promover un enfriamiento evaporativo indirecto de la estructura al evaporarse la humedad superficial del montículo.

ORGANISMO	ESPECIE	ESTRATEGIA	UBICACIÓN	CLIMA
Hormiga	<i>Atta capiguara, A. laevigata</i>	Ventilación	Brasil Argentina	Templado húmedo Cálido húmedo
	<i>Atta vollenweideri</i>			



Figura 5.31: Arquitectura externa del montículo de *Atta vollenweideri*. Fuente: Asknature.org

Las hormigas del especie *Atta* construyen nidos subterráneos como protección contra depredadores y para obtener un microclima propicio para las necesidades de la colonia. Se les conoce como cortadoras de hojas ya que recolectan material vegetal como sustrato para los hongos que cultivan dentro del nido y de los cuales se alimentan.

De las especies micófagas que habitan en México, el género *Atta* es considerado uno de los más sobresalientes por el tamaño de sus colonias y sus hábitos forrajeros, se reportan tres especies que habitan en la República Mexicana. La especie *Atta mexicana* tiene una amplia distribución y se ha registrado a lo largo de 19 estados del país, *A. cephalotes* se ubica en estados del sureste y *A. texana* se ha encontrado en Tamaulipas y Veracruz (Rojas Fernández, 2001).

VI. Ventilación en las construcciones de la hormiga *Atta laevigata* y *A. capiguara*.

Según el estudio de Bollazi, Forti y Roces en la zona de Botucatu en Sao Paulo, Brasil, los nidos de *Atta laevigata* presentan un montículo de 1m de alto y un diámetro de 4 a 8m con aberturas distribuidas de forma uniforme.

Los nidos de *A. capiguara* en contraste no poseen un montículo general que corona el nido, más bien son varios montículos pequeños. Las aberturas se encuentran en la parte superior de los montículos o directamente sobre el terreno. En los nidos de ambas especies solo las aberturas ubicadas en las partes bajas se utilizan para el acceso de los habitantes. La altura promedio reportada de las aberturas para *A. laevigata* fue de 0.31m mientras que la más alta fue de 0.80m. Para *A. capiguara* la altura más baja fue de 0.08m hasta 0.26m la más alta.

Ambos presentan aperturas de acceso usualmente interconectadas por túneles que corren paralelamente a la superficie exterior, de estos se bifurcan conductos secundarios que van adentrándose más profundamente hasta terminar en un conducto cerrado o en una cámara.

Las cámaras están conectadas a los conductos secundarios mediante un único túnel de cortas dimensiones, llamado pedúnculo. Estas cámaras en su mayoría contienen los cultivos de hongos y unos cuantos se utilizan para almacenar desperdicio usualmente éstas a mayor profundidad (Bollazzi et al., 2012).

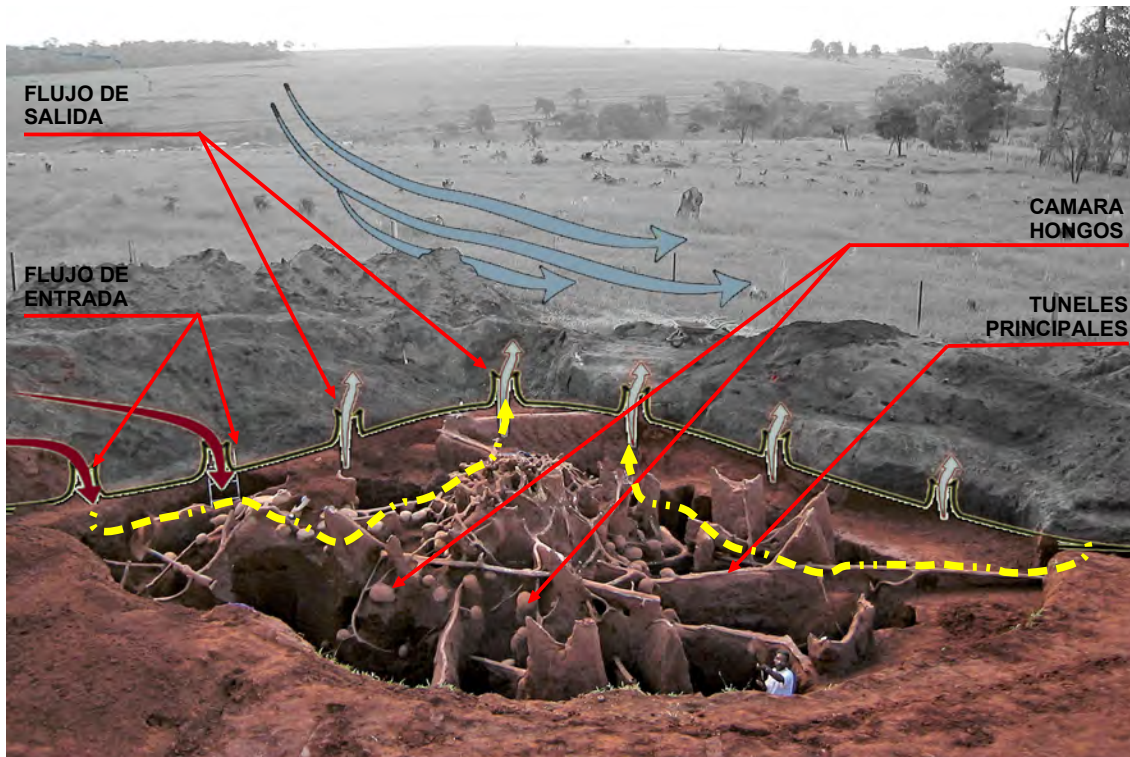


Figura 5.32: Arquitectura del montículo de *Atta leavigata* según Bollazzi, Forti y Roces 2012 ubicado en Sao Paulo, Botucatu, Brasil. Latitud 22°50'46"S y longitud 48°26'02"W. Vaciado de la estructura interna en cemento y posterior excavación. Imagen modificada a partir de Bollazzi et al., 2012.

Las especies que habitan en espacios subterráneos aprovechan la protección contra eventos externos como depredadores o variaciones del clima, sin embargo la renovación del aire interior se ve comprometida al disminuirse el intercambio con el aire exterior.

Algunas de las colonias estudiadas del género *Atta* contienen cerca de 8,000 cámaras de hongos algunas hasta a 7m de profundidad y con una colonia de varios millones de individuos. Esto supone una alta producción de CO₂ y de requerimiento de O₂ por lo que la ventilación del nido es un tema prioritario a resolver por parte de la colonia (Bollazzi et al., 2012).

Los resultados de la investigación de Bollazi, Forti y Roces muestran que la arquitectura externa del montículo promueve la ventilación forzada mediante un gradiente de presión vertical y por tanto independiente de la dirección del viento. Segundo que el aire que circula por el nido no alcanza a llegar directamente hasta las cámaras donde se cultivan los hongos, debido a la intrincada red que forman los túneles y que son las partes más profundas.

Para demostrar lo anterior se encontró cuales aberturas funcionaban como entrada del aire exterior y cuales promovían la salida. Por un lado se inyectó un gas rastreable (propano) para poder definir la ubicación y dirección del fluido, por el otro una vez caracterizado la función de cada una de las aberturas se procedió a modificar la altura de las mismas para obtener evidencia de la importancia del gradiente de altura y por tanto de la presión diferencial que ejerce el viento.

Se observó que para que se diera la circulación de aire deben existir una abertura de entrada y una de salida. Y que a partir de una diferencia de altura del 40% entre la entrada y la salida se daba la ventilación forzada.

También se detectó que a mayor diferencia de altura se presentan distintas concentraciones de gases. Las mediciones en las aberturas a menor altura mostraron mayores concentraciones de O_2 y menores de CO_2 mientras que las aberturas a mayor altura presentaron datos opuestos (Bollazzi et al., 2012).

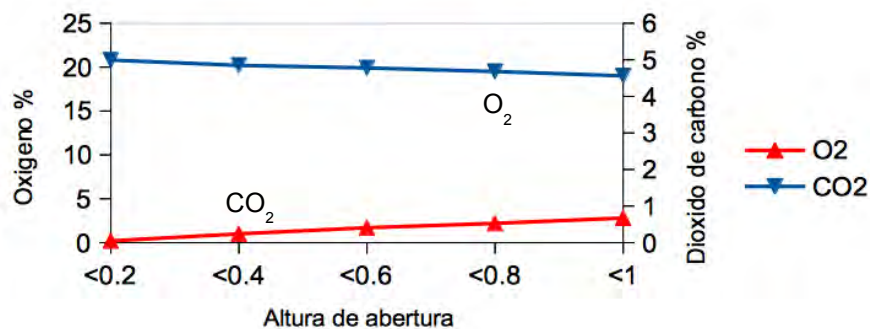


Figura 5.33: Concentraciones de gases registradas en las aberturas en relación con la altura relativa, para *Atta laevigata*. Se observa que las aberturas a menor altura contienen mayores cantidades de Oxígeno y las aberturas a mayor altura presentan mayores concentraciones de Dióxido de carbono, lo que concuerda con la hipótesis de renovación de aire interior mediante el acceso de aire "puro" por las partes bajas y salida del aire "contaminado" por las partes altas. El aire exterior durante la medición contenía 20.9% de Oxígeno y 0.03% de Dióxido de carbono. Fuente: Bollazi et al., 2012.

La altura de las aberturas en todos los casos se considera relativa ya que lo que resulta relevante no es la altura total medida desde la base del montículo, si no la diferencia de altura entre la abertura del flujo de entrada y la de salida.

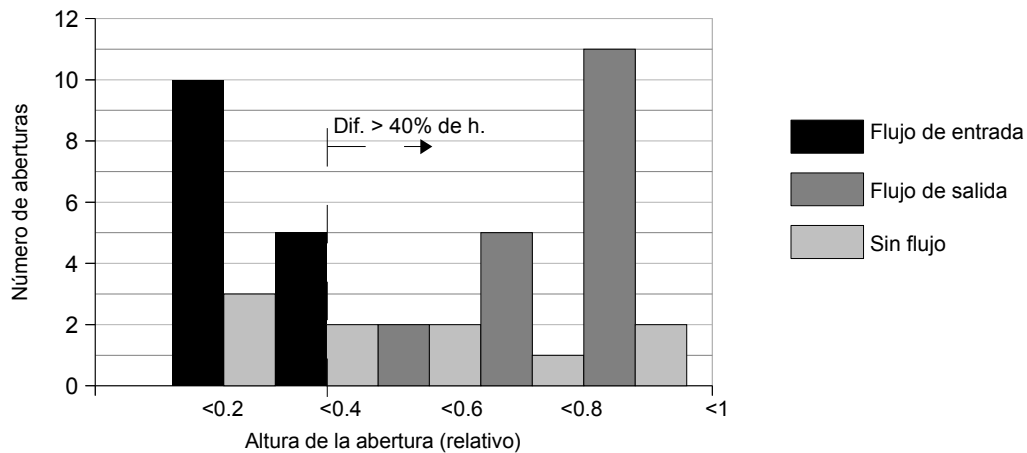


Figura 5.34: Caracterización de aberturas en función de la altura para un montículo de *Atta laevigata*. Se observa que a menor altura las aberturas funcionan como acceso de aire y conforme aumenta la diferencia de altura cambian su función como salida del aire interno. Fuente: Bollazi et al., 2012.

Dado que en las mediciones no se detectó que el flujo de aire circulante alcanzara las cámaras de hongos, los autores proponen como una hipótesis a considerar un mecanismo difusivo de intercambio de aire en las partes más profundas del nido. Por otro lado se considera poco probable un mecanismo de termosifón para el mismo ya que se desestimó que fuera relevante el calor metabólico producido dentro de las cámaras (Bollazzi et al., 2012).

VII. Ventilación en las construcciones de la hormiga *Atta vollenweideri*.

En la especie *Atta vollenweideri* estudiados por Kleineidam y Roces en la Provincia de Formosa, Argentina. Se muestran adaptaciones de los nidos a las condiciones climáticas locales.

Esta especie vive regularmente en zonas inundables, por lo que las hormigas durante el periodo de lluvias en el verano se confinan en el nido, el cual si ha tenido un periodo suficiente de maduración, ha desarrollado un montículo mayor que los nidos jóvenes.

La forma de domo del montículo funciona como protección contra inundaciones ya que las aberturas se encuentran por encima de los 20cms del nivel del suelo. En cambio los nidos jóvenes se ven obligados a cerrar las aberturas con barro y pequeñas piezas de vegetación.

Desarrollan sus construcciones en suelos arcillosos con alto niveles de humedad por lo que no son favorables para promover una característica porosa que contribuya al intercambio de gases al interior del nido (Kleineidam y Roces, 2000).

Según los investigadores esta especie modifica la arquitectura de los nidos construyendo unas llamativas torres en la parte central del montículo como protección contra inundaciones, pero también pueden deberse a maximizar el efecto de ventilación forzada (Kleineidam y Roces, 2000). En particular esta característica se ha observado en los montículos ubicados en zonas de pastizales y no en zonas boscosas, por lo que aprovecharían las zonas abiertas para aumentar los beneficios de la ventilación en el nido (Kleineidam et al., 2001).

En un estudio posterior realizado en laboratorio con *Atta vollenweideri* se encontró que a pesar de que se les dotó de materiales con diferentes granulometrías, las hormigas construyeron torres con una porosidad regular entre el 50 y el 60% presentando la hipótesis de mantener un equilibrio entre la economía de material y mantener la integridad estructural de las torres (Cosarinsky y Roces, 2011).

VIII. Velocidad de viento y renovación del aire interior.

Kleineidam y Roces encontraron en su estudio que hay una marcada relación entre la velocidad del viento y las concentraciones de CO₂ dentro del nido. Sus mediciones muestran que una mayor velocidad de viento se encuentran menores cantidades de dióxido de carbono.

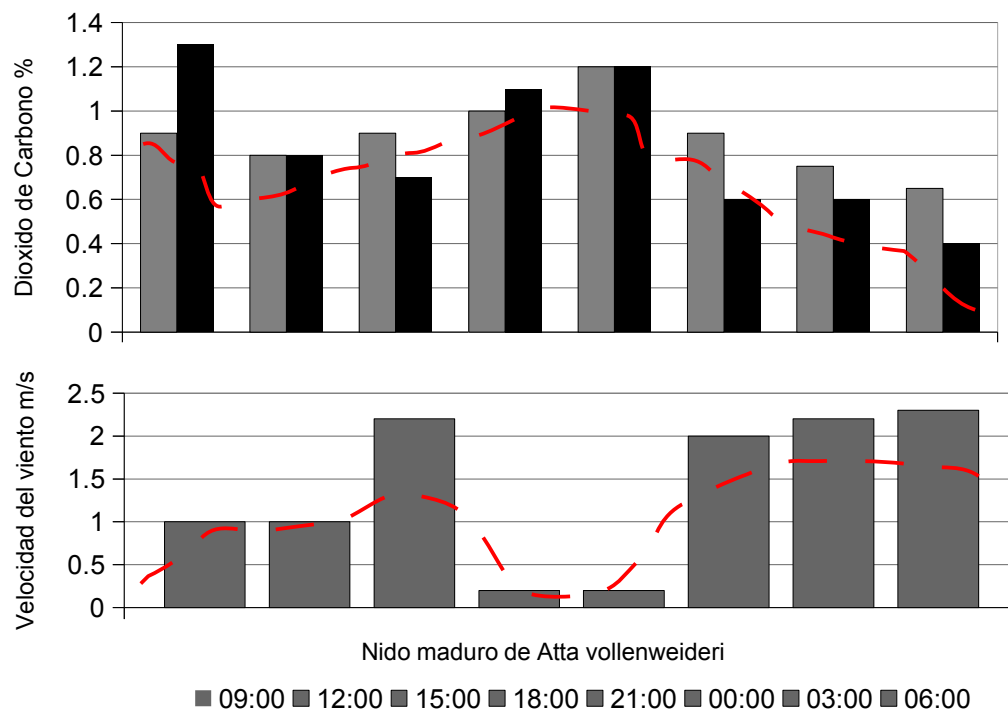


Figura 5.35: Correlación entre la velocidad del viento y la concentración de CO₂, medido durante 21 hrs a una profundidad de 2.0 m. Se observa que a un aumento en la velocidad del viento es seguida una disminución de CO₂. Fuente: Kleineidam y Roces, 2000.

Por otro lado se muestra la oscilación diaria de la temperatura y la humedad relativa, medida a solo 0.10m de profundidad dentro de uno de los túneles en comparación con los datos obtenidos a 1.00m de profundidad, igualmente en uno de los conductos (Kleineidam y Roces, 2000).

Los rangos de temperatura y humedad del nido se han considerado como fundamentales en particular para la especie de hongos que se cultiva en el interior y de los cuales depende la alimentación de la colonia. Según menciona Kleineidam y Roces las temperaturas por encima de los 30°C son perjudiciales para ellos.

Se ha observado que las hormigas obstruyen las aberturas o las torres en periodos fríos o durante lluvias fuertes, sin embargo no se conocen los mecanismos de regulación higrótérmica y que papel juega en estos la ventilación del nido. Es posible que los datos presentados están más influenciados por el amortiguamiento térmico del terreno que al acceso de aire al interior del nido, como se discutió en el caso de las termitas *Macrotermes michaelseni*.

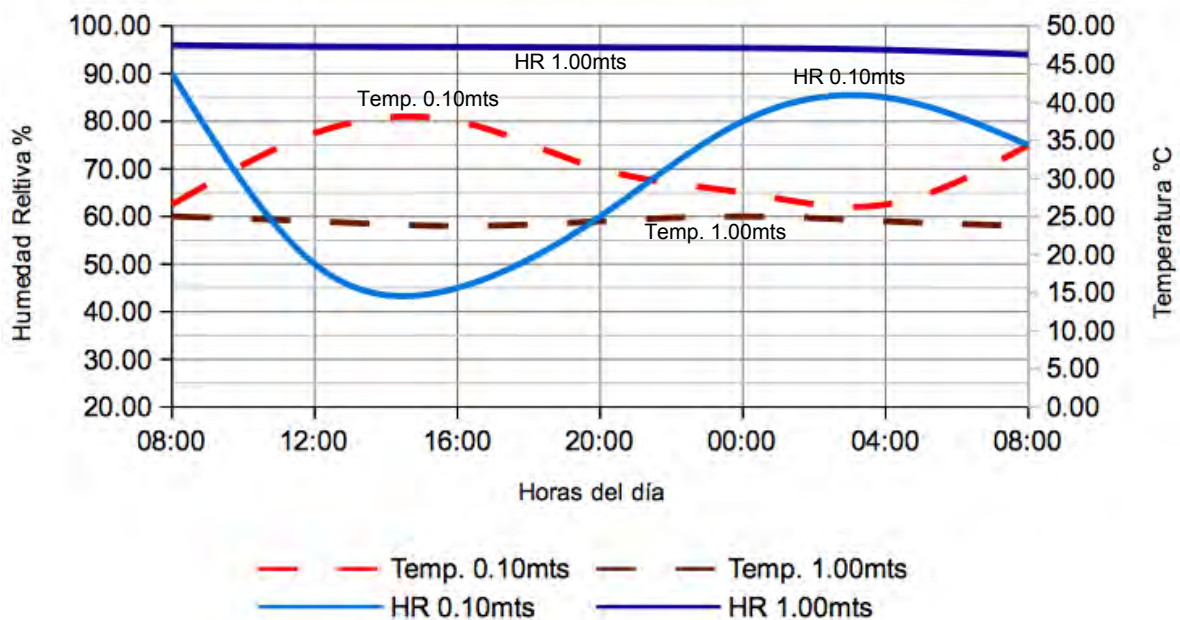


Figura 5.36: Temperatura de bulbo seco y humedad relativa diaria medida a dos diferentes profundidades 0.10m y 1.00m dentro de los túneles del montículo de *Atta Vollenweideri*, estudiado en la Provincia de Formosa, Argentina. Latitud 25°S y longitud 58°W. Las mediciones se realizaron entre Diciembre de 1997 y Febrero de 1998. Se observan datos muy estables de temperatura y humedad a 1.00 m de profundidad en comparación con la oscilación de los datos medidos superficialmente. Fuente: Kleineidam y Roces, 2000.

En un estudio posterior se encontró que la función de las aberturas, es decir flujo de entrada o de salida, no depende de la dirección del viento y que el mecanismo de flujo de salida se presenta antes que el flujo de entrada, el desfase entre los dos mecanismos depende de la velocidad del viento, entre mayor es éste el retraso entre ambos es menor, mostrando la marcada relación entre la velocidad del viento en el exterior y la que se presenta en los túneles (Kleineidam et al., 2001).



Figura 5.37: Torres de ventilación de los montículos de *Atta vollenweideri*. Fuente: Izquierda, Cosarinsky y Rocés, 2011. Derecha, Alexanderwild.com

IX. Interpretación bioclimática.

El clima en Botucatu, Sao Paulo, Brasil es semicálido húmedo según la clasificación Köppen - García (A)Ca(f) (i')gw" con una temperatura media anual de 21°C, una humedad relativa media anual de 75% y una precipitación de 2,100mm anuales, sí presenta alta oscilación térmica de 15°C. Según la agrupación bioclimática de ciudades de Fuentes y Figueroa sería un clima templado húmedo.

En la provincia de Formosa, Argentina es cálido húmedo según la clasificación Köppen - García (A)Ca(f) (e)w" con una temperatura media anual de 23°C, una humedad relativa media anual de 70% y una precipitación de 2,300mm anuales, también presenta alta oscilación térmica de más de 20°C. Según la agrupación bioclimática de ciudades sería un clima cálido húmedo (Fuentes Freixanet, 2004).

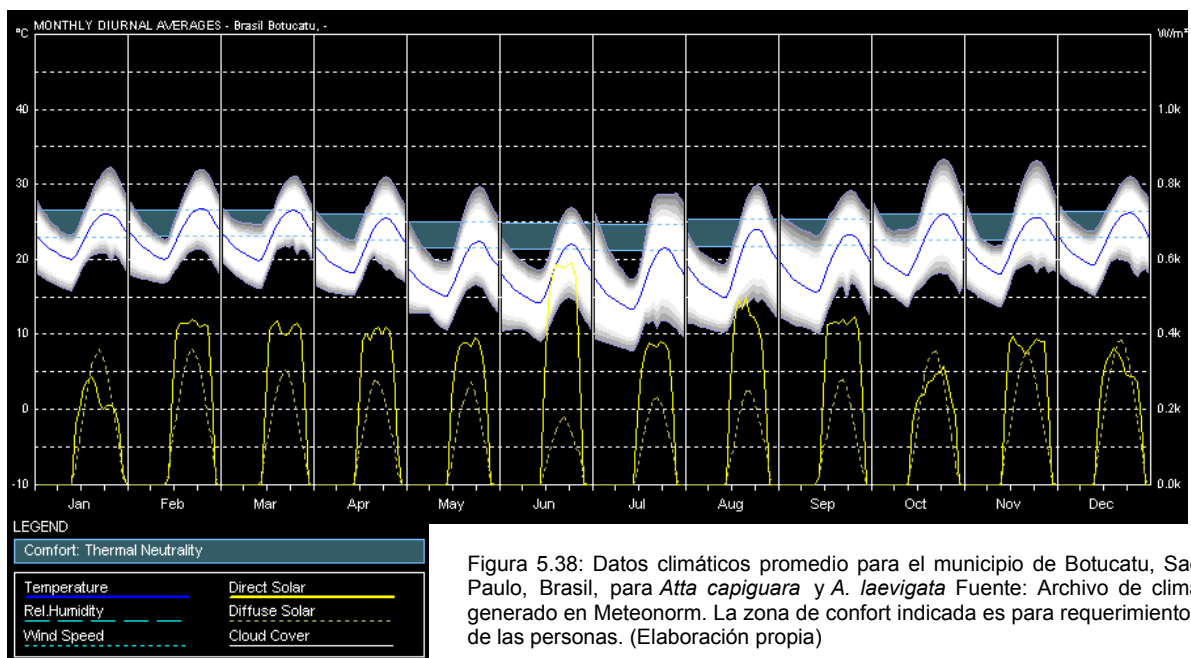


Figura 5.38: Datos climáticos promedio para el municipio de Botucatu, Sao Paulo, Brasil, para *Atta capiguara* y *A. laevigata* Fuente: Archivo de clima generado en Meeonorm. La zona de confort indicada es para requerimientos de las personas. (Elaboración propia)

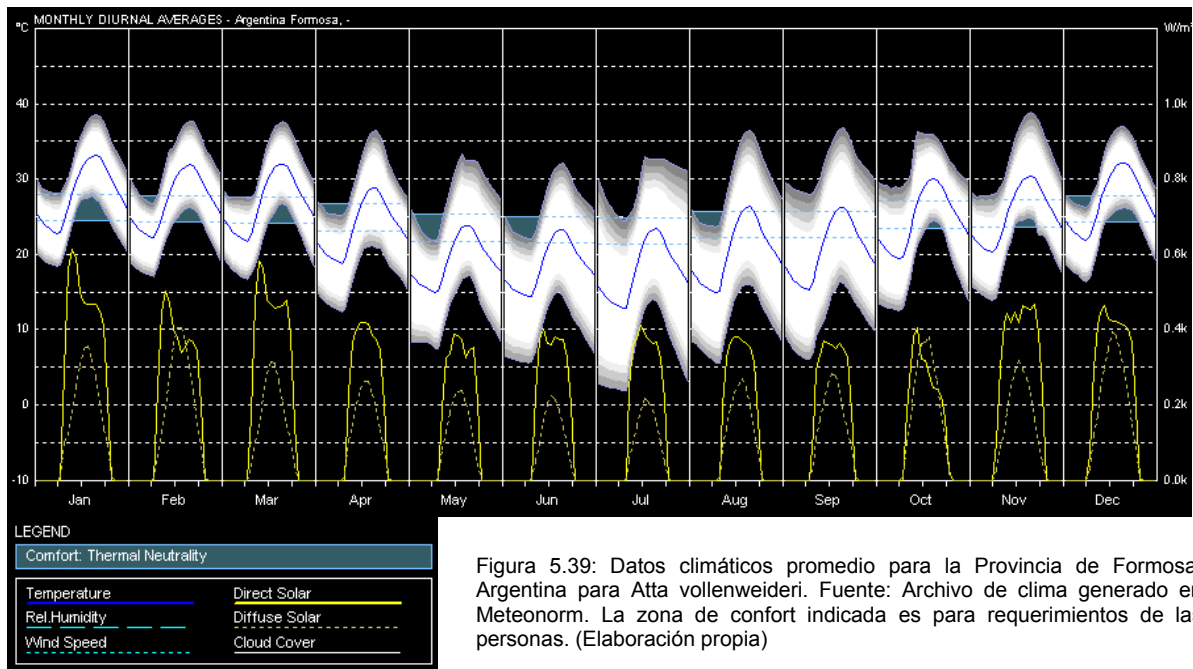


Figura 5.39: Datos climáticos promedio para la Provincia de Formosa, Argentina para Atta vollenweideri. Fuente: Archivo de clima generado en Meteonorm. La zona de confort indicada es para requerimientos de las personas. (Elaboración propia)

Precipitación	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	octubre	nov	dic	Anual
Botucatu	2,637	2,396	2,568	2,217	1,849	1,677	1,587	1,633	1,778	2,204	2,228	2,497	2,106
Formosa	2,957	2,656	2,915	2,474	1,962	1,886	1,609	1,633	1,768	2,461	2,483	2,877	2,307
Temp. max													
Botucatu	31.60	29.40	30.20	30.00	28.50	25.10	25.40	26.80	29.80	30.70	29.50	30.20	28.93
Formosa	38.60	37.00	35.20	35.60	29.40	26.90	31.10	30.60	36.40	34.10	35.00	36.00	33.83
Temp. media													
Botucatu	22.90	23.20	23.20	21.60	18.50	17.70	16.90	18.90	19.40	21.70	21.50	22.60	20.68
Formosa	27.90	27.00	26.90	23.60	19.20	18.40	17.60	20.00	20.70	24.60	25.00	27.00	23.16
Temp. min													
Botucatu	17.30	17.50	16.70	16.20	11.80	9.40	8.90	10.50	11.80	14.40	13.70	16.50	13.73
Formosa	19.60	18.50	17.50	15.00	8.90	6.10	4.50	5.80	9.00	12.90	13.90	18.90	12.55
Oscilación													
Botucatu	14.30	11.90	13.50	13.80	16.70	15.70	16.50	16.30	18.00	16.30	15.80	13.70	15.21
Formosa	19.00	18.50	17.70	20.60	20.50	20.80	26.60	24.80	27.40	21.20	21.10	17.10	21.28

VERANO OTOÑO INVIERNO PRIMAVERA

Figura 5.40: Comparativo de datos climáticos entre la Provincia de Formosa y Botucatu Brasil. (Elaboración propia)

Adaptación al clima.

Ambas poblaciones donde se realizaron los estudios de los montículos presentan climas similares, siendo más extremo el correspondiente a Formosa, Argentina, en particular la oscilación térmica que en los dos casos es muy elevada a pesar de que existen altos niveles de humedad.

De los estudios referenciados no se desprenden diferencias sustanciales con base en la arquitectura de los nidos de ambas especies, desde el punto de vista de el uso de estrategias de climatización pasiva. Diferencias que permitan correlacionar cada uno de los climas con sus respectivas construcciones.

Se puede deducir que las arquitecturas con mayor tiempo de maduración resultan con adaptaciones más eficientes a las condiciones de clima local.

Un domo de mayor altura representa una adaptación para emplazamientos en zonas con altos niveles de precipitación pluvial y zonas inundables, el cual se no se presenta en montículos jóvenes. Aunque estos si presentan una adaptación activa que consiste en obstruir las aberturas, aunque sea a costa de la ventilación (Kleineidam y Roces, 2000).

Probablemente la adaptación más clara sea la utilización de torres como dispositivos para maximizar la ventilación o la protección durante los periodos de lluvias, lo mismo el control activo que se menciona que realizan los habitantes al cerrar las aberturas en periodos fríos o de intensa lluvia. Sin embargo no puede extenderse la idea de ser un elemento distintivo de uso para un clima u otro, ya que la especie *A. vollenweideri* donde se reporta el uso de torres se conoce que habita tanto en zonas de Argentina como en Brasil y no en todos los casos.

Se menciona que la temperatura óptima para el cultivo de hongos dentro del nido *Atta*, se encuentra alrededor de los 25°C a 30°C (Kleineidam y Roces, 2000), sin embargo se desconocen los mecanismos de regulación higrotérmica, si es que los hay y que papel juega la ventilación en ello.

En los datos de temperatura y humedad relativa que se muestran al interior del nido de *A. vollenweideri* en Formosa, Argentina (Kleineidam y Roces, 2000), se observa un notable amortiguamiento de ambos parámetros a comparación con la considerable oscilación de las mediciones superficiales.

Sin embargo no se menciona en el estudio los datos del comportamiento higrotérmico a lo largo del año, por lo que es posible que el supuesto control del microclima se deba en parte al amortiguamiento térmico que proporciona el estar enterrado. El nido pudieran presentar una oscilación similar a la del terreno a lo largo del año como la de el caso de las *Macrotermes michaelseni* (Turner y Soar, 2008).

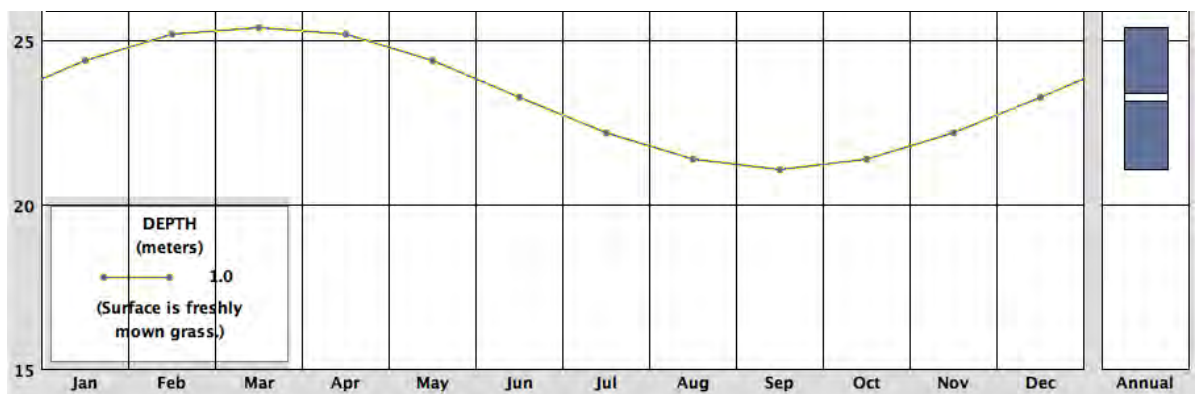


Figura 5.41: Temperatura anual promedio del terreno en la provincia de Formosa, Argentina. Medida a 1m de profundidad Fuente: Archivo de clima generado en Meteornorm y analizado en Climate Consultant 5.4. Nótese que la oscilación térmica es alrededor de 5°C en comparación con los 21°C de oscilación de la temperatura exterior. (Elaboración propia)

Ventilación forzada.

La ventilación del espacio o espacios internos en la arquitectura del nido es la estrategia de climatización más notoria, al menos basándose en las investigaciones citadas. En principio parece que la principal función de la ventilación es la renovación del aire interior y no en cuanto a regular niveles higrotérmicos, como se expuso en el caso de las termitas *Macrotermes michaelseni*.

El gradiente de velocidad aprovechado en las construcciones animales produce un diferencial de presión sobre la estructura exterior y por tanto presenta un potencial posible de realizar un trabajo. Es decir, potencial de proveer de energía suficiente para un proceso o función en específico, en este caso el intercambio de gases entre el nido y el exterior.

Este mecanismo se considera como una estrategia de ventilación pasiva ya que permite reducir el uso de energía, metabólica en el caso de la hormiga *Atta*, que requerirían para realizar la adecuada ventilación del nido.

En el caso de las construcciones del género *Atta* la ventilación forzada se presenta como la principal estrategia de renovación del aire. En la figura 5.35, se muestra un promedio de concentraciones de CO_2 de 0.80% a una profundidad de 2.0 m para una colonia de varios millones de individuos (Kleineidam y Roces, 2000). Como parámetro para comparar con los requerimientos de las personas se considera que el aire puro contiene una proporción de 0.03% y en zonas urbanas contaminadas puede llegar hasta 0.07% (García Chávez y Fuentes Freixanet, 2005).

La forma de bóveda ofrece protección contra la lluvia y en particular aprovechar el diferencial de velocidad del viento. Para maximizar el efecto de succión que ocurre en la parte superior se observan torres porosas para el flujo de salida.

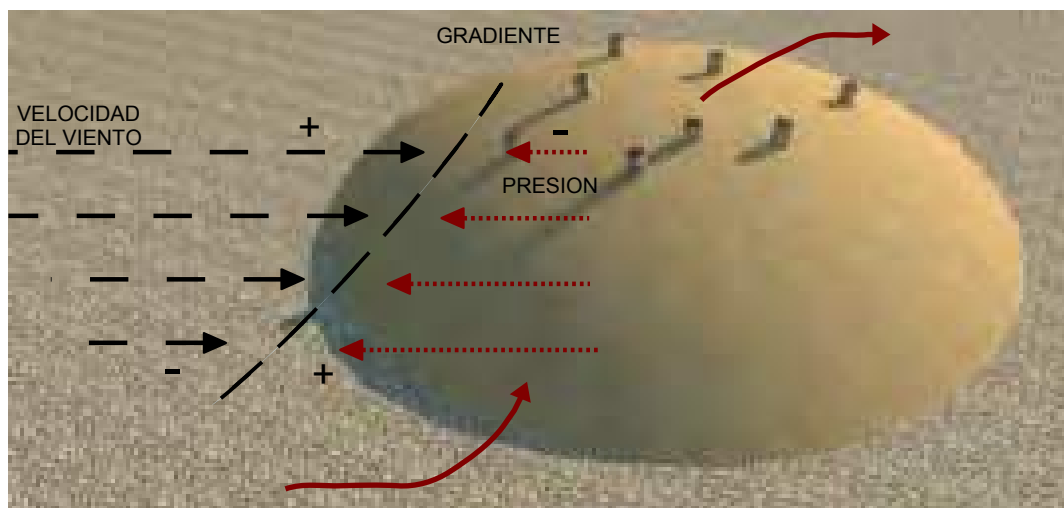


Figura 5.42: Modelo tridimensional del montículo de la hormiga *Atta*, de 3.1m de radio y 1.0m de alto, para simular el gradiente de velocidad del viento. (Elaboración propia)

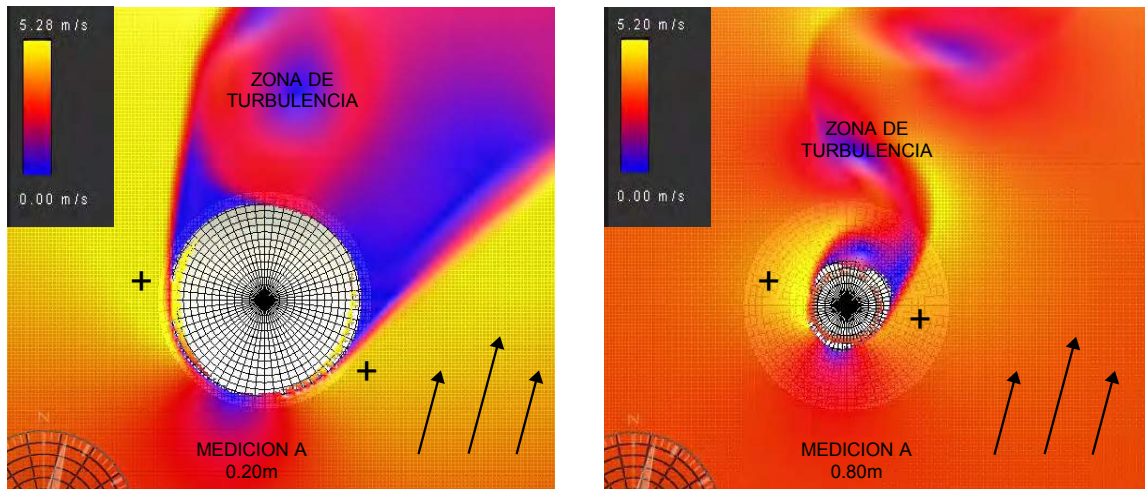


Figura 5.43: Modelo tridimensional del montículo de la hormiga *Atta*, de 3.1m de r. y 1.0m de alto. Sombra del viento generada para una velocidad de 3m/s, estimada a 0.20m y a 0.80m. Análisis generado en Autodesk Vasari Beta 3.0. (Elaboración propia)

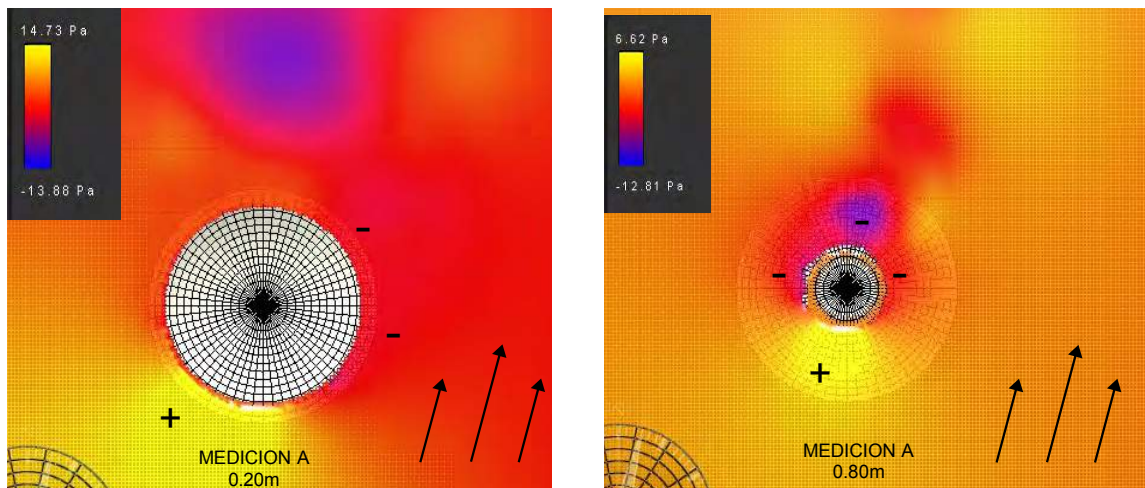


Figura 5.44: Gradiente de presión para una velocidad de viento de 3m/s, estimada a 0.20m y a 0.80m. Se observa una presión aproximada de 14.73 Pa en la base y una presión de 6.62 Pa en la parte superior. Análisis generado en Autodesk Vasari Beta 3.0. (Elaboración propia)

Como mecanismos secundarios de ventilación se presenta la hipótesis de un intercambio de gases difusivo y aunque se considera poco relevante, un intercambio por efecto de termosifón, ambos ubicados en las partes más profundas del montículo. Por lo que puede deducirse que la eficacia de la ventilación forzada encuentra sus límites en cavidades similares a las de las cámaras de hongos y los ductos que las conectan (Kleineidam et al., 2001).

5.3.- Termorregulación.

I. Termorregulación en la arquitectura.

Si bien la búsqueda de confort se compone de la integración de varios factores, la regulación del ambiente térmico es uno de los mecanismos más importantes para alcanzar condiciones de bienestar. Puede observarse que varias de las estrategias de diseño bioclimático están relacionadas de una u otra forma con la interacción de los flujos de calor dentro y fuera de espacios habitados.

El cuerpo humano es capaz de regular de forma autónoma la temperatura interna, también es posible modificarla con base en el comportamiento, ingiriendo alimentos, buscando arropamiento o realizando actividad física. De igual forma que en los animales, se considera desde el punto de vista del comportamiento que las personas pueden modificar su entorno térmico por medio de la arquitectura.

Los factores ambientales que determinan el ambiente térmico son la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad y la humedad del aire. La diferencia de temperatura del aire interior y el exterior promueve el flujo térmico. Los materiales que están expuestos a la radiación solar se saturan de calor hasta que alteran el interior. El movimiento del aire sobre estas superficies puede acelerar el intercambio convectivo o agregar humedad a las superficies puede incrementar el flujo térmico debido a la alta conductividad del agua (Olgay, 2010).

Todos estos efectos térmicos afectan la envolvente del edificio como si fuera un material poroso que absorbe la humedad, al saturarse de calor el efecto es perceptible en la superficie interior (Olgay, 2010). Como indica Szokolay el edificio no es solo un refugio, debe ser una envolvente dinámica y selectiva que aproveche los factores ambientales benéficos y rechace los negativos (Szokolay, 2008).

Se considera de manera general que los materiales de la envolvente deben amortiguar la variación de la temperatura exterior, deben presentar un retraso de tiempo cuando se presenta el máximo de la temperatura interior con respecto al máximo de la temperatura exterior (lo más cercano a 12h) y en climas cálidos presentar menor sobrecalentamiento al interior (Huelsz et al., 2012).

Olgay también considera que las características más importantes de los materiales en su comportamiento térmico es la oscilación y el retardo. La primera depende de la capacidad aislante, usualmente descrito por el *coeficiente de transmisión total de calor "U"*. La segunda depende la capacidad acumulativa de calor del material, relacionada con la densidad (espesor) y el calor específico (*c*). El uso adecuado de estas dos características mediante el diseño permite un desempeño térmico que promueve el confort de manera pasiva (Olgay, 2010).

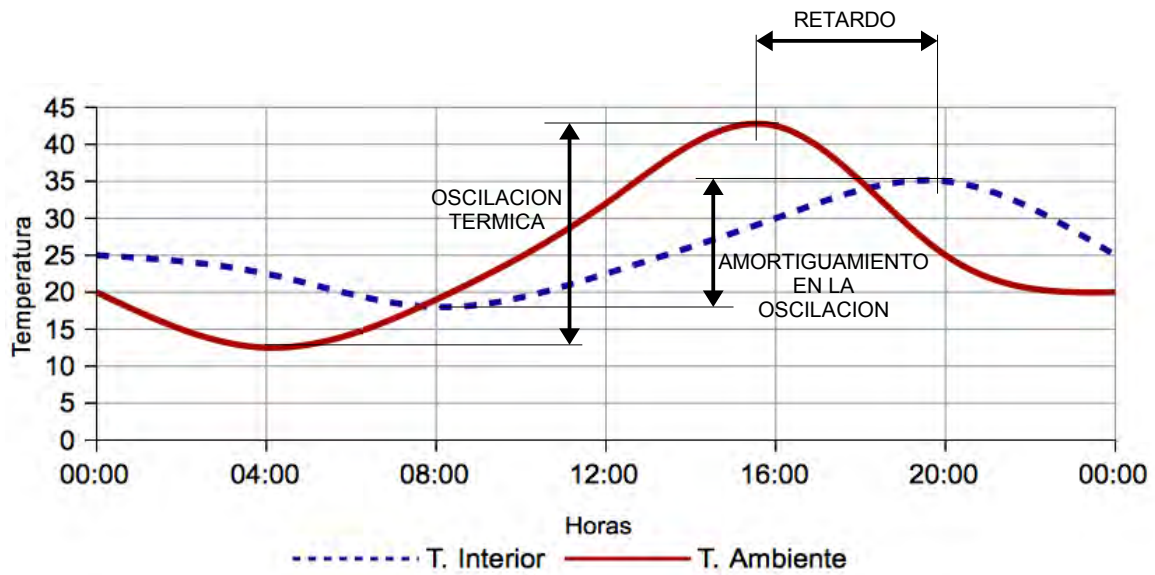


Figura 5.45: Gráfica de amortiguamiento y retardo térmico. Comportamiento térmico “adecuado” de un material dado, reduce la amplitud en la temperatura ambiente y retarda su propagación al interior. (Elaboración propia)

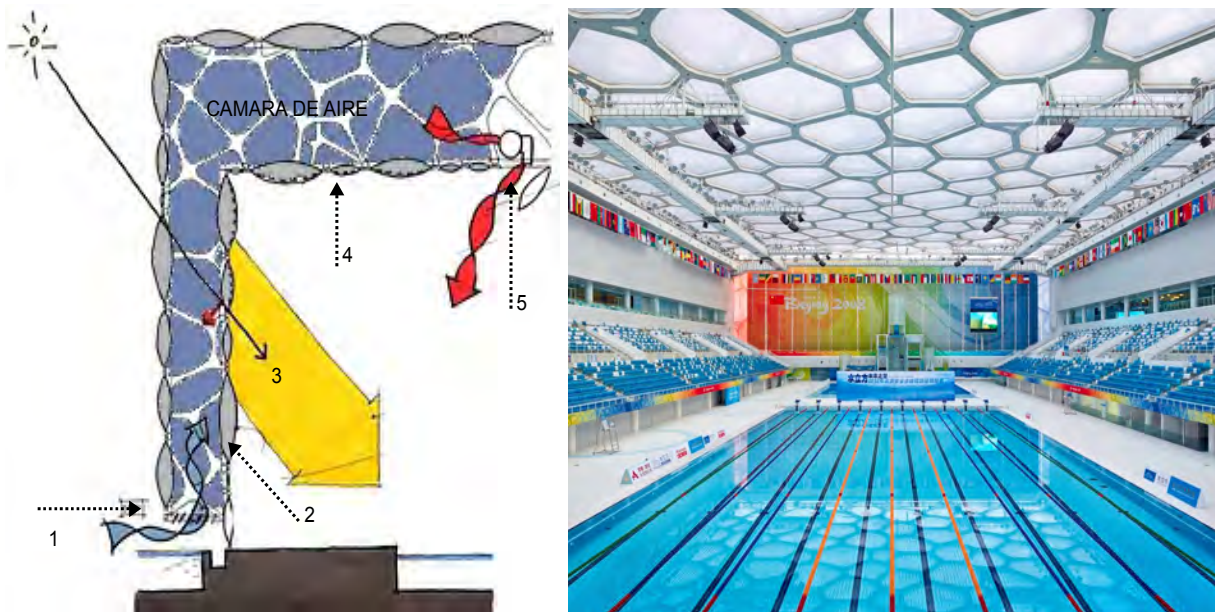


Figura 5.46: Envoltorio del National Aquatics Center (Watercube), Beijing, PTW Architects. Formada por una doble fachada de Ethylene tetrafluoroethylene, *ETFE*. Y una cámara aislante de aire. Izquierda: Corte esquemático, 1) Entrada de aire fresco. 2) Célula traslúcida de *ETFE* (efecto invernadero). 3) Iluminación natural y calentamiento pasivo. 4) Mecanismo para oscurecer la fachada. 5) Extractor mecánico para inyectar aire precalentado en la envoltorio. Fuente: continuingeducation.construction.com. Derecha: Interior del centro acuático. Fuente: ptw.com.au.

II. Termorregulación en la arquitectura animal.

ORGANISMO	TRIBU	ESTRATEGIA	UBICACIÓN	CLIMA
Abeja	<i>Apini</i>	Termorregulación	Varias	Varios
	<i>Meliponini</i>			

Según Jones y Oldroyd la regulación del ambiente térmico puede dividirse en estrategias pasivas o activas. Las primeras consisten en la selección del sitio para ubicar el nido, la orientación solar y la arquitectura del nido. Se reportan dos grandes grupos para distinguir a las abejas en cuanto a sus construcciones, las especies melíferas y las llamadas abejas sin aguijón (Jones y Oldroyd, 2007) y (Gould y Grant, 2007).

III. Estrategias Pasivas.

a) Selección del sitio.

La selección del sitio en insectos sociales se basa principalmente en elegir un sitio que promueva protección contra un disturbio externo y un microclima con temperatura relativamente estable (Jones y Oldroyd, 2007).

Entre las abejas melíferas (*Apis mellifera*), las abejas sin aguijón (*Meliponini*) y los abejorros (género *bombus*) la selección del sitio es usualmente en cavidades, las más comunes en troncos huecos, en algunas ocasiones reutilizan nidos subterráneos de termitas o roedores. Este tipo de cavidades promueven el aislamiento y mantienen las ganancias metabólicas.

i) Para especies sin aguijón.

Muchas especies sin aguijón, el uso de una cavidad es la estrategia inicial de Termorregulación. Por ejemplo las especies sudafricanas *Trigona* (*T. denoiti*, *T. griboidoi*) las utilizan, ya sea enterradas (de 60 a 100cm) o dentro de un árbol hueco. Según reportan Jones y Oldroyd estas condiciones implican que la colonia rara vez experimenta estrés térmico (Jones y Oldroyd, 2007).

ii) Para especies melíferas.

Atributos para la selección del nido: Acceso soleado, menor a 75cm², volumen cavidad mínimo de 15lts (0.015m³) y elevación desde el suelo alrededor de 3mts.

b) Orientación del nido.

En climas tropicales existen nidos abiertos donde procuran una exposición adecuada a la radiación solar. Según reporta Jones y Oldroyd la especie asiática *Apis dorsata* construye nidos de un solo peine, orientados norte-sur para maximizar la incidencia solar y minimizar la exposición a vientos fríos (Jones y Oldroyd, 2007).



Figura 5.47: Nidos de un solo peine vertical de la abeja melífera, *Apis dorsata*.
Fuente:encyclopedie-universelle.com

Algunos casos como la *Apis florea* construyen nidos completamente expuestos, pueden contener un solo peine vertical o varios, con una separación constante de el diámetro de dos abejas, seguramente esto permite realizar tareas en ambas caras al mismo tiempo (Gould y Grant, 2007).

c) Arquitectura del nido.

La primer estrategia de regulación térmica es la selección de una cavidad como sitio para desarrollar el nido, para Jones y Oldroyd este mecanismo es más preciso cuando se encuentran capas aislantes alrededor del nido, la forma del peine o peines y la ubicación en estos de las celdas para las crías, que se considera el corazón térmico de los nidos..

En el género *bombus* (abejorros): Agregan pastos y trozos de plantas para mejorar el aislamiento. También construyen un dosel a partir de cera para atrapar el calor metabólico (Jones y Oldroyd, 2007).

i) Especies sin aguijón. Estructura del nido con tres capas aislantes.

Capa de Batumen (muro): Recubrimiento para la cavidad a base de propóleo (savia, resinas arbóreas o mezcla de plantas) o una mezcla de cera y propóleo y en ocasiones materia vegetal y barro. Sella toda la cavidad a excepción de la entrada y en algunas especies orificios de ventilación.

Capa funcional: A base de depósitos de miel o polen, construidos con cerumen (cera y propóleo).

Capa Involucrum: A base de delgadas láminas de cerumen unidas entre si y los depósitos de miel o polen. Usualmente esta capa rodea el área de cría. Se ha observado que en zonas frías especies del género *melipona* construyen capas de involucrum de mayor espesor que en los bosques ecuatoriales (Jones y Oldroyd, 2007).

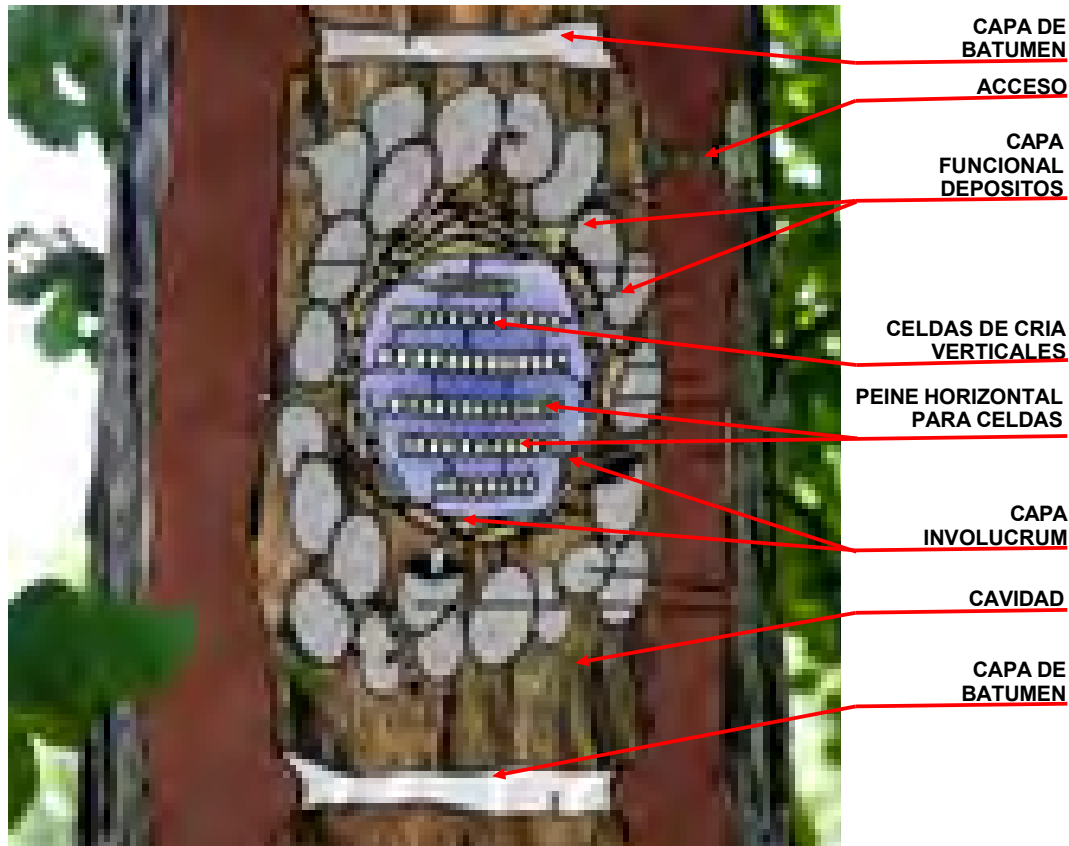


Figura 5.48: Esquema de la estructura de tres capas del nido de una abeja *Meliponini*. Basado en encyclopedie-universelle.com

d) Uso de los materiales.

Según Gould y Grant los materiales que utilizan las abejas para la construcción de las estructuras del nido son como siguen.

Batumen: Resistente al agua, algunas especies recolectan resinas de planta y savia de los arboles para mezclarla con “pulpa” o lodo para crearlo. Utilizado como aislamiento o recubrimiento para la humedad. A este compuesto en ocasiones se le agrega cera producida por las mimas abejas en particular con mejores resultados a temperaturas mayores. Se usa como estructura defensiva (1 a 3” de espesor) para sellar la parte alta o baja de la cavidad del árbol.

Cerumen: Compuesto a base de propóleo o batumen con cera producida por las abejas. Mientras mayor sea la proporción de cera en la mezcla posee mayor resistencia a deformarse. Se utiliza a diferencia del batumen como una multicapa aislante.

Miel: Posible de almacenarse por lo que le da independencia alimenticia a la colonia. Esta compuesta del néctar de las flores tratado con una enzima que altera las azúcares. Todas las abejas sin aguijón almacenan la miel que producen, en una especie de depósitos de cerumen en forma de ovoide. Estos depósitos también se utilizan para almacenar polen, que consumen la abejas como fuente de proteína (Gould y Grant, 2007).

Otra variación en la arquitectura de los nidos se presenta en algunas especies australianas como la *Trigona carbonaria* que construye un peine central en forma de espiral, esto le permite eliminar los pilares que en otras especies sostienen los peines horizontales. Según Jones y Oldroyd este tipo de nidos se construyen en cavidades más pequeñas lo que permite tener un mejor control de la temperatura.

En especies sin aguijón que construyen nidos al exterior como la *Trigona spinipes*, las capas aislantes se construyen de batumen, algunos de estos nidos presentan aberturas, Jones y Oldroyd comentan que es probable que se utilicen como ventilación (Jones y Oldroyd, 2007).



Figura 5.49: Izquierda, Nido de *Trigona spinipes*, Peru. Fuente:amazonecology.wordpress.com Derecha, Apiario de una *Trigona carbonaria*. Fuente:encyclopedie-universelle.com. Puede observarse al centro las celdas hexagonales y alrededor la envolvente a base de capas de involucrum.

Camargo y Pedro muestran los hábitos de anidación del género *Partamona*, la especie *P. bilineata* que habita en varios estados de la República Mexicana hasta Ecuador construye nidos en cavidades con accesos notablemente ornamentados. La especie *P. testacea* que habita en Brasil, construye nidos dentro de comunidades activas de termitas u hormigas del género *Atta* (Camargo y Pedro, 2003).

Algunas especies como *P. vicina* construye nidos arbóreos que rodean exteriormente el tronco o los nidos de *P. testacea* son siempre subterráneos y consisten en un vestíbulo con pasajes laberínticos a base de tierra y resinas. Y una cámara principal de celdas para incubar y almacenar alimento, aunque en algunos casos puede haber cámaras adyacentes que almacenen alimento (Camargo y Pedro, 2003).

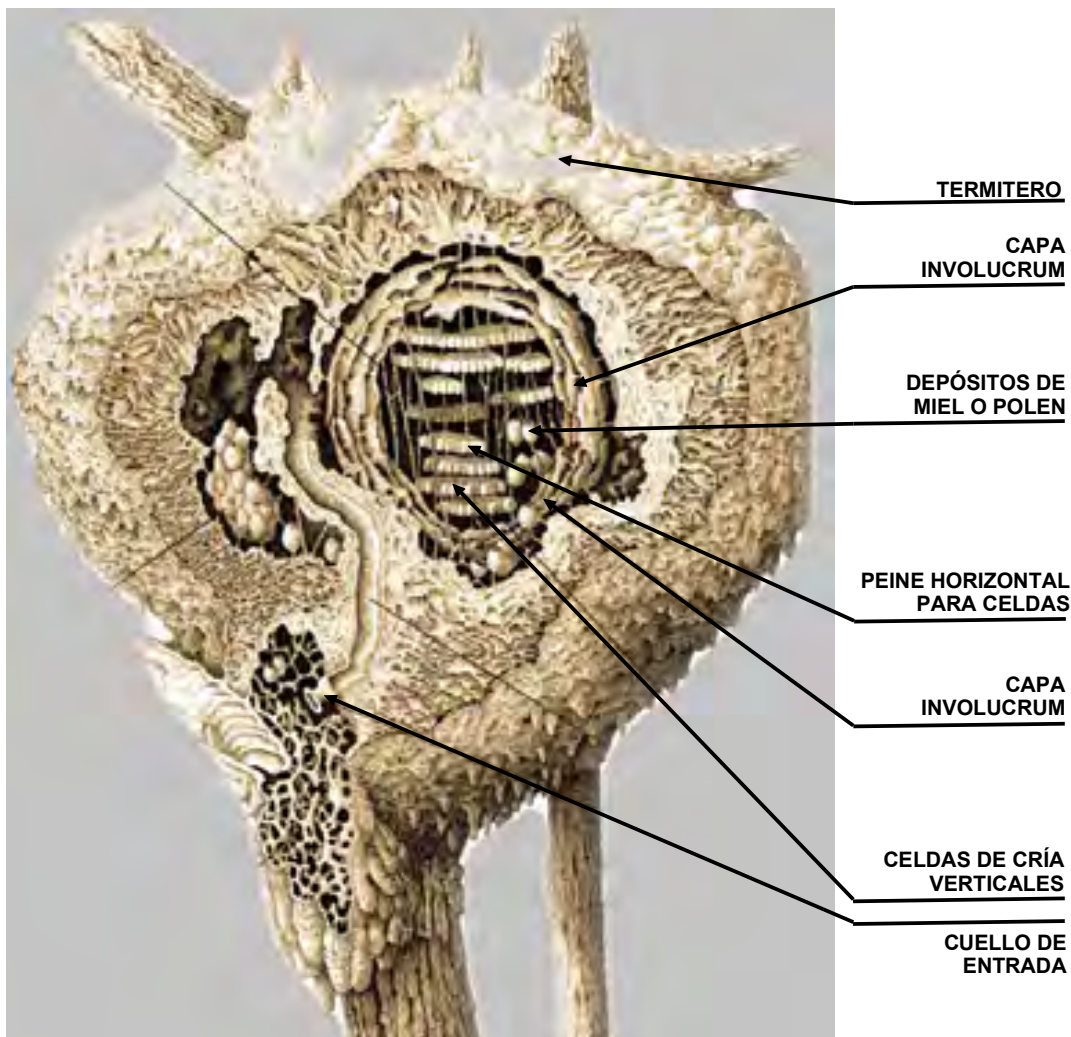


Figura 5.50: Nido de *Partamona pearsoni*, corte longitudinal en termitero arbóreo activo. Fuente: Camargo y Pedro, 2003.

ii) Especies melíferas: Difieren en sus construcciones en el uso peines verticales y las celdas de cría se disponen en forma horizontal, ubicadas en dos capas una contra otra (en contraste las especies sin aguijón construyen peines horizontales). Las partes altas y periféricas están ocupadas por depósitos de polen y miel mientras que las partes centrales más aisladas térmicamente están ocupada por las crías. Otra diferencia relevante es que las celdas que contienen a las crías son iguales a las que almacenan miel o polen a diferencia de las abejas sin aguijón que construyen depósitos diferentes (Gould y Grant, 2007).

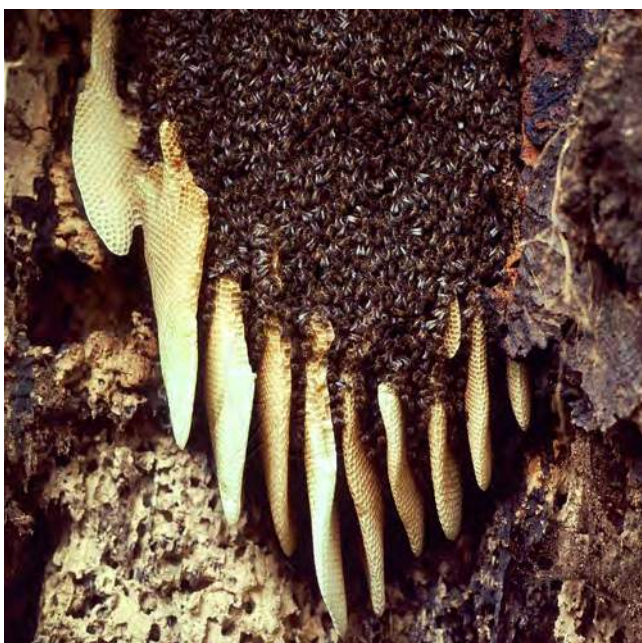


Figura 5.51: Izquierda, peines verticales de *Apis mellifera* en cavidad. Fuente: warrenphotographic.co.uk. Derecha, peines verticales de *Apis mellifera* en nido expuesto. Fuente: bwars.com.

IV. Estrategias activas en abejas y avispa.

Los mecanismos activos son complementarios a las estrategias pasivas e implica una modificación de la temperatura del nido mediante actividades físicas, estas requieren de un gasto energético por parte de los individuos, como la generación de calor metabólico o el enfriamiento por aleteo.

Entre las abejas y las avispa las condiciones de bajo calentamiento pueden minimizarse mediante dos mecanismos, el primero de manera individual al generar calor metabólico al contraer los músculos. El segundo mecanismo se realiza en conjunto, el calor generado es contenido por los trabajadores al agruparse en círculos muy compactos (*clustering*) sobre las áreas de crías. Este proceso observado tanto en nidos en cavidades como expuestos, puede ser regulado al juntarse o separarse como respuesta activa a los cambios de temperatura (Jones y Oldroyd, 2007).

El agrupamiento como estrategia de regulación térmica se basa en relacionar la temperatura ambiental con la morfología del organismo, este puede ser descrito mediante el cociente del área superficial entre el volumen de un objeto (SA/VOL). Dado que la superficie exterior es la que se ve expuesta al intercambio térmico por radiación o convección, a mayor superficie mayor intercambio térmico.

El agrupamiento observado en los insectos reduce la superficie disponible para el intercambio térmico con el ambiente. Debido a que los insectos son organismos pequeños en comparación con los mamíferos, poseen un cociente alto de SA/VOL por lo que se ven expuestos a importantes intercambios térmicos con el exterior. Al agruparse modifican esta relación a un cociente mayor similar a la de un organismo de mayor tamaño por lo que el intercambio de temperatura es más lento (Visscher, 2009).

En condiciones de sobre calentamiento se reportan dos estrategias principales, promover la ventilación por aleteo. En nidos contenidos los trabajadores la realizan en el acceso para promover el flujo del aire. En construcciones abiertas ventilan hacia el nido, para promover la convección. El segundo mecanismo esta basado en el enfriamiento evaporativo, aquí los individuos recolectan agua y la colocan sobre las celdas para después evaporarla mediante la ventilación por aleteo (Jones y Oldroyd, 2007).

V. Interpretación bioclimática.

Las especies reportadas anteriormente presentan en general tres estrategias pasivas para regular la temperatura interna del espacio. Primero la selección de una cavidad para ubicar el nido, segundo la construcción de una envolvente multicapa y por último la disposición de los espacios más importantes en ubicaciones más aisladas térmicamente.

De la utilización de una cavidad se desprenden dos mecanismos, el uso de un material aislante como es la madera que en este caso se convierte en la primer capa de envolvente del espacio. Y por otro lado un espacio enterrado que aprovecha las cualidades térmicas de inercia del terreno natural. Presentan las dos cualidades térmicas buscadas en los materiales, el amortiguamiento en la variación de la temperatura y el retardo en la propagación del flujo al interior de la construcción. Una estrategia combinada se observa en las construcciones del género *Partamona*, que ubican sus nidos dentro de termiteros construidos a base de tierra pero suspendidos en árboles (Camargo y Pedro, 2003).

En cuanto a la envolvente multicapa se considera que tiene capacidades aislantes y que reduce las pérdidas por convección y conducción. Sin embargo no se conocen las propiedades térmicas de los materiales empleados como los valores de conductividad, densidad o calor específico del batumen o involucrum.

Para la miel se reportan valores similares de conductividad térmica y calor específico a los que presenta el agua. Es posible que existan cavidades de aire atrapado en particular en las láminas del involucrum aunque no se reporta en las investigaciones.

Material	Calor específico (J/Kg grado °C)	Densidad Kg/m ³	Conductividad térmica (W/m grado °C 10 ⁻³)
Miel (<i>Apis mellifera</i>)	3,785.000	-	550.000
			593.000
Agua	4,190.000	1,000.000	580.000

Tabla 5.2:Propiedades térmicas de la miel en comparación con el agua. Fuente:Choi y Okos, 1986

La capa funcional a la que se refiere Jones y Oldroyd, formada por los depósitos de miel o polen representan una especie de muro de agua que posee alta capacidad de almacenamiento térmico. Esta en combinación con las propiedades aislantes de la madera de la cavidad es similar al acomodo de un panel aislante de EPS y un muro de concreto. Se sabe que los elementos que poseen el aislante en la parte exterior o en la parte central presentan mejor desempeño térmico, es decir presentan mayor amortiguamiento y un retardo más cerca a las 12 horas (Huelsz et al, 2012).

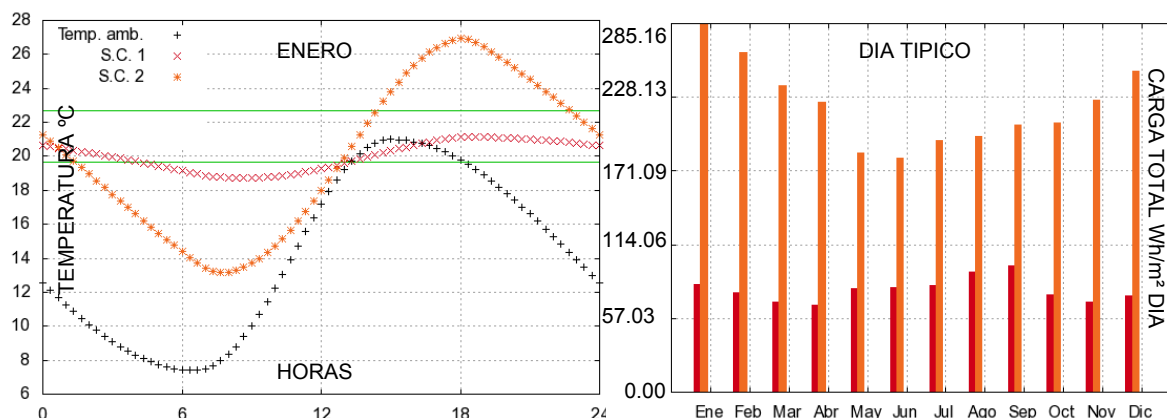


Figura 5.52: Izquierda, desempeño térmico de dos sistemas constructivos para un día típico de enero en la Ciudad de México. **SC.1**:EPS exterior + concreto. **SC.2**:Concreto + EPS interior. Se observa un mejor desempeño del **SC.1** en cuanto a amortiguamiento y retardo. Derecha, gasto energético requerido para dos sistemas constructivos. **SC.1** (rojo):Madera exterior + Concreto + EPS interior. **SC.2** (naranja):Madera exterior + Concreto. Se observa que el sistema de tres capas (dos aislantes y una central con inercia térmica) requiere menor gasto energético para alcanzar condiciones de confort. Simulación realizada con la herramienta en línea ENERHABITAT, Fuente:enerhabitat.unam.mx

Torres, Hoffmann y Lamprecht realizaron investigaciones sobre las características de Termorregulación en dos especies de abejas sin aguijón, *Tetragonisca angustula* y *Trigona (frieseomelitta) nigra paupera*, ambas especies habitan desde el sur de la República Mexicana hasta Sudamerica, estas fueron analizadas al norte de Colombia (Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007 y 2009).

Estas arquitecturas difieren en que la especie *Frieseomelitta* no construye celdas de incubación en peines horizontales sino en un arreglo agrupado de forma espiral y no contiene la envolvente formada por el involucrum.

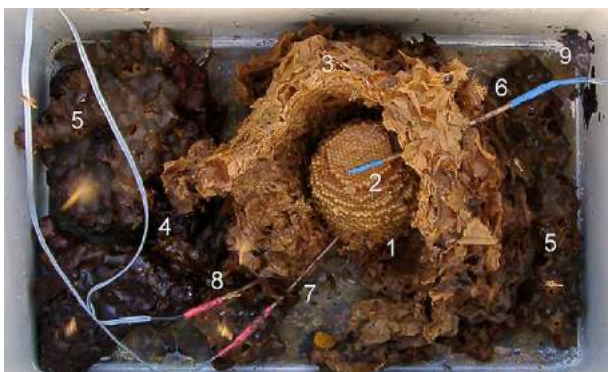


Figura 5.53: Contenedor con un nido de *Tetragonisca angustula*. 1) área de cría, 2) peines horizontales, 3) involucrum, 4/5) área de almacén, 6) sensor superior, 7) medio, 8) bajo, 9) ducto de entrada. Fuente: Torres, et al. 2007.



Figura 5.54: Contenedor con un nido de *Trigona (frieseomelitta) nigra paupera*. 1) área de cría, 2) área de almacén, 3) ducto de entrada, 4) sensores para área de cría, 5) sensor para área de almacén. Fuente: Torres, et al. 2009.

Tetragonisca angustula (con involucrum)

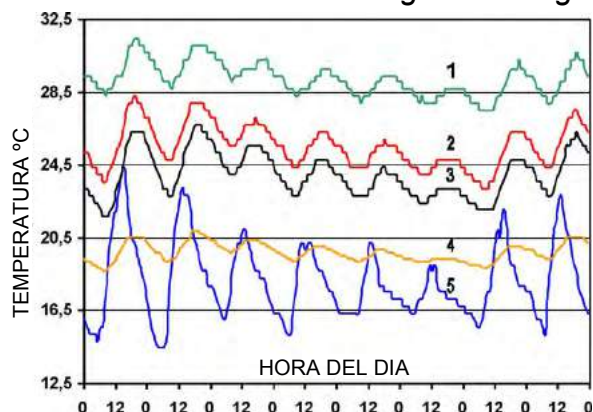


Figura 5.55: Temperaturas del nido de *Tetragonisca angustula*. 1) parte superior del nido, 2) centro del nido (zona de cría), 3) fondo del nido, 4) potes de miel, 5) temperatura del aire exterior. "0" y "12" indica medianoche y mediodía, medición del 9 al 16 de marzo de 2006. Fuente: Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007.

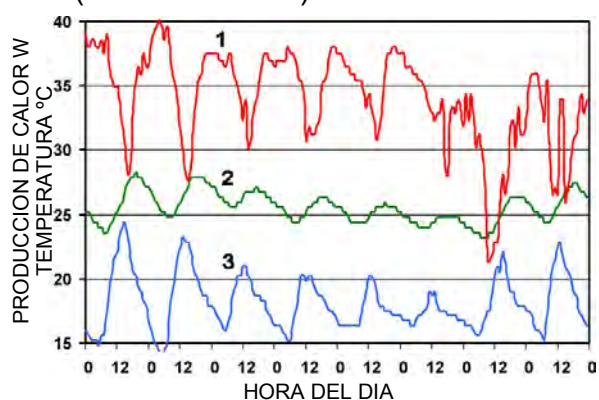


Figura 5.56: Producción de calor dentro del nido de *Tetragonisca angustula*. 1) tasa de producción de calor, 2) zona de cría, 3) temperatura del aire exterior. "0" y "12" indica medianoche y mediodía. La tasa de producción de calor fue multiplicada por 100 para tener valores comparables. Fuente: Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007.

Trigona (frieseomelitta) nigra paupera (sin involucrum)

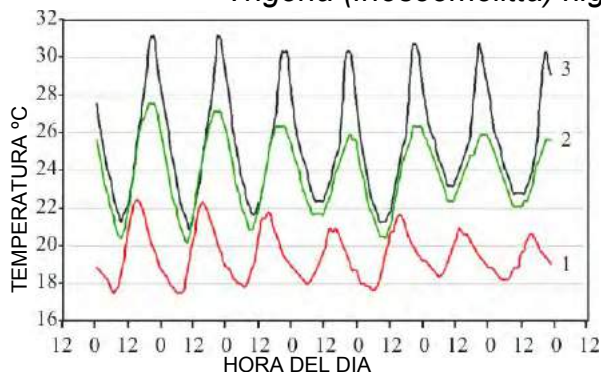


Figura 5.57: Temperaturas del nido de *Trigona (frieseomelitta) nigra paupera*. 1) temperatura del aire exterior, 2) área de almacén, 3) área de cría. "0" y "12" indica medianoche y mediodía, medición del 13 al 19 de mayo de 2008. Fuente: Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2009.

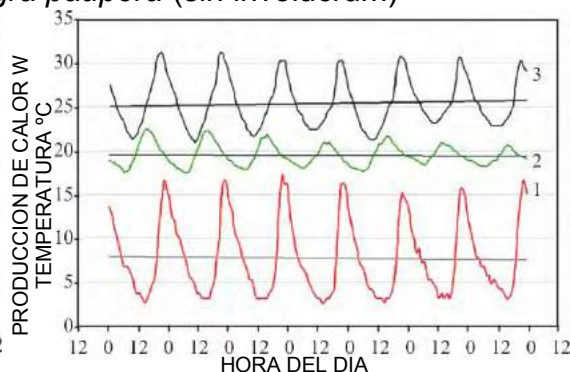


Figura 5.58: Producción de calor dentro del nido de *Trigona (frieseomelitta) nigra paupera*. 1) tasa de producción de calor, 2) temperatura del aire exterior, 3) área de cría. "0" y "12" indica medianoche y mediodía. Tasa de producción de calor fue multiplicada por 100 para tener valores comparables. Fuente: Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2009.

Se midió la temperatura interna de ambas especies dentro de un contenedor artificial por lo que el efecto aislante de la cavidad usualmente constituida por un tronco hueco no debe ser considerado.

Interpretando los resultados de ambas investigaciones se observa que las mayores temperaturas se presentaron dentro del área de crías, en el caso de *T. Angustula* en la parte superior seguramente debido a la estratificación térmica. La oscilación en la temperatura ambiente afecta los demás parámetros, en menor medida el área del almacén de alimentos. Torres, Hoffmann y Lamprecht suponen que es debido a la mayor capacidad calorífica del contenido (miel o polen) (Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007 y 2009).

También se observa un desfase en las curvas de temperatura, por lo que los materiales deben presentar algún nivel de amortiguamiento, particularmente se observa en el área del almacén. Por otro lado se observa en las gráficas de producción de calor al interior del nido que la relación es inversa a la temperatura ambiente, es decir cuando se presenta la menor temperatura ambiente la colonia reacciona de forma activa produciendo mayor cantidad de calor. Según Torres, Hoffmann y Lamprecht la colonia trata de mantener el nido templado durante las noches frías (Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007 y 2009).

Las diferencias en las condiciones en que se realizan ambos estudios no permiten hacer una comparación directa de los casos de estudio, por ejemplo la colonia de *T. Angustula* contenía 2,000 individuos contra 5,000 del otro ejemplo. Sin embargo los autores (Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007 y 2009) sí proponen comparar ambos casos para poder estimar el papel que desempeña en el flujo térmico el involucrum como envolvente del nido.

Especie	Involucrum	Volumen del nido	No. Trabajadores	Calor producido por trabajador	Población	Altitud
<i>Tetragonisca angustula</i>	SI	1.0L	5,000.00	0.068 W	Santander Colombia	1600msnm
<i>Trigona nigra paupera</i>	NO	1.4L	2,000.00	0.0359 W	Santander Colombia	1200msnm

Tabla 5.3: Características de los nidos estudiados. Estudio de *T. Angustula* en 7° 27'N y 72° 38'W y *T. Nigra paupera* en 7° 54'N y 72° 63'W Fuente: Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007 y 2009.

El nido que contiene involucrum (*T. Angustula*) presenta mayor temperatura media, una menor amplitud en la misma y un mayor desfase en el tiempo. Puede decirse que mantiene una temperatura más estable, sin embargo el gasto energético por individuo es mayor en el ejemplo con envolvente a base de involucrum, 0.068W promedio por trabajador (5,000) comparado con 0.0359W con 2,000 trabajadores del ejemplo sin involucrum (Torres, Hoffmann y Lamprecht, 2007 y 2009).

En general se reporta que el involucrum es el elemento más destacado térmicamente de la envolvente, sin embargo algunas especies utilizan además el batumen como una capa no solo que delimita las partes altas o bajas sino que abarca todo el perímetro de igual forma que el involucrum. Como la especie taiwanesa *Trigona ventralis hoozana* (Sung, et al. 2008).

La tercer estrategia observada, la disposición de los espacios más importantes en ubicaciones más aisladas térmicamente, se presenta en las construcciones de las especies melíferas. Como se mencionó en estas construcciones las celdas de incubación y los depósitos de alimento son iguales, estos últimos se ubican dentro del peine en las partes periféricas mientras que las incubadoras se encuentran en la parte central (Gould y Grant, 2007).

Aquí los depósitos con alta capacidad calorífica desempeñan otra vez la función de una envolvente con cualidades de inercia térmica, en este sentido similares a los nidos de la género *Partamona* que utilizan los termiteros de tierra con esta función. Algunas especies de avispas también utilizan esta estrategia manteniendo un perímetro de celdas vacías alrededor de las incubadoras.

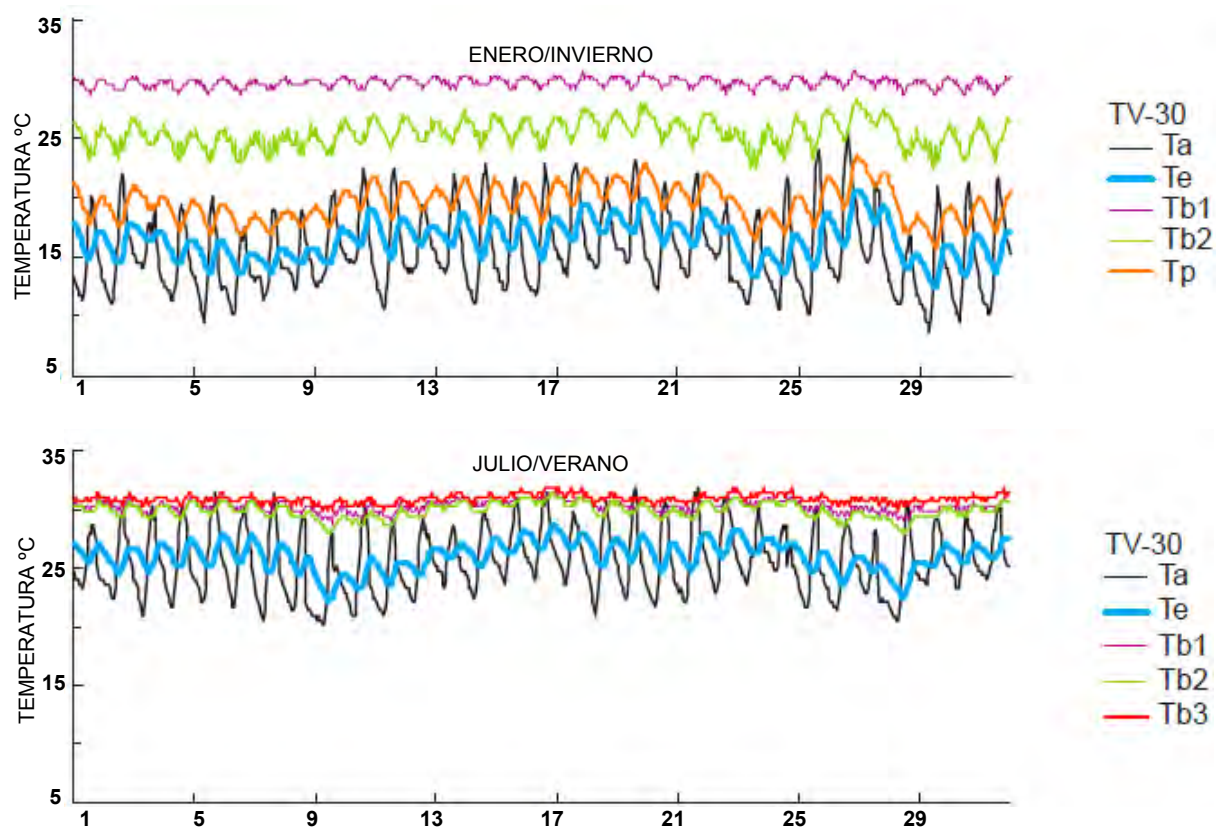


Figura 5.59: Medición de temperaturas del nido de *Trigona ventralis hoozana* en invierno y verano. Ta: temperatura ambiente, Te: temperatura de un espacio vacío dentro de la cavidad sin formar parte del nido. Tb1, 2 y 3: temperatura del área de cría, superior, inferior y centro. Tp: temperatura del área de depósitos. Fuente: Sung, et al. 2008. Se observa menor amplitud térmica en la zona de cría y el efecto aislante de la cavidad representado en Te, que a pesar de tener menor temperatura si muestra amortiguamiento.

ORGANISMO	SUBFAMILIA	ESTRATEGIA	UBICACIÓN	CLIMA
Avispa	<i>Polistinae</i>	Termorregulación	Varias	Varios
	<i>Vespinae</i>			

VI. Termorregulación en las construcciones de avispas.

a) Selección del sitio.

Las especies de avispas sociales incluyen una variedad de ubicaciones muy similares a las abejas. Subterráneas, cavidades de árboles y otros suspendidos de ramas de árboles, para Jones y Oldroyd la selección de estos sitios promueve estabilidad térmica (Jones y Oldroyd, 2007).

b) Arquitectura del nido.

Jones y Oldroyd consideran que las estrategias de regulación térmica de las avispas pueden ubicarse a grandes rasgos, según las subfamilias que componen el género. La *Polistinae* y *Vespinae*, estas difieren entre otras cosas en la arquitectura del nido.

i) Arquitectura del nido expuesta – Envoltente funcional.

La subfamilia *Polistinae*, construyen nidos expuestos, por lo que las estrategias de Termorregulación recaen en gran medida en las condiciones ambientales del sitio elegido. Un estudio de Satoshi Hozumi y Sôichi Yamane sobre los nidos de la especie *Polistes riparius*, que habita la zona norte de Japón, muestra la utilización de una “envoltente funcional” para regular las condiciones térmicas de este tipo de construcciones (Hozumi y Yamane, 2001).

El nido consiste de un solo peine vertical de forma ovoidal, formado a base de las celdas hexagonales de cría, que se van agrupando en círculos concéntricos. Hozumi y Yamane, se refieren a una envoltente funcional como las celdas periféricas que terminan el nido y que las avispas mantienen vacías. Sería un equivalente a la cámara de aire que se forma en la envoltente de los nidos del género *Vespinae*.

Utilizando modelos de papel, construyeron una serie de prototipos similares a los nidos de las *Polistes riparius* y realizaron mediciones de la temperatura en diferentes puntos del nido. Los resultados muestran que las celdas periféricas que forman la envoltente funcional, aíslan térmicamente las celdas centrales que contienen a las crías, incluso durante las noches donde el componente solar no es factor, las celdas centrales mantuvieron una temperatura por encima de la temperatura ambiente. Particularmente las celdas centrales presentaron la segunda temperatura más alta y la segunda menor oscilación, por lo que puede decirse que estas celdas presentan las condiciones más adecuadas (Hozumi y Yamane, 2001).

El factor que presentó más influencia en la regulación térmica fue el largo de las celdas, por lo que los autores deducen que ya que el nido se encuentra expuesto, las pérdidas por convección son mayores que las que se deben por conducción entre celdas continuas (Hozumi y Yamane, 2001). Es probable que la forma circular del nido presentando una mayor profundidad de las celdas al centro, se deba a una reacción para reducir la convección.

Por otro lado como se mencionó, las condiciones ambientales del sitio seleccionado tienen un alto impacto, las celdas expuestas a la radiación solar tienen mayor inestabilidad térmica, o la temperatura del aire y el viento alteran los rangos de temperatura del nido (Hozumi y Yamane, 2001).

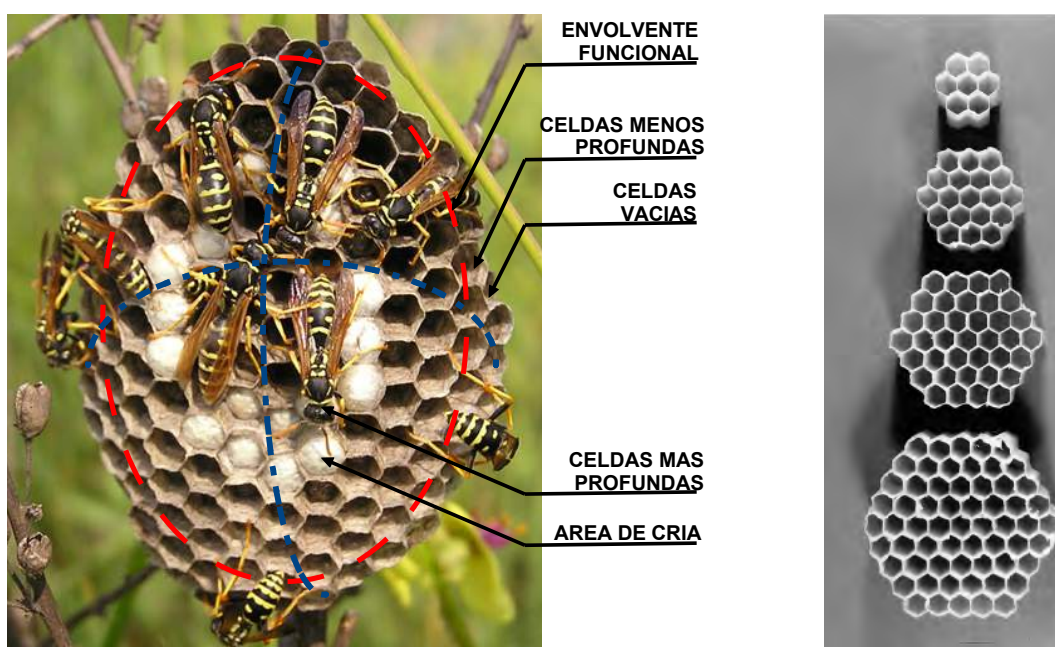


Figura 5.60: Izquierda, nido de *Polistes gallicus* fuente: commons.wikimedia.org. Derecha, esquema de envoltorio funcional, fuente: (Hozumi y Yamane, 2001).

ii. Arquitectura del nido a base de módulos de una sola envoltorio.

El género *Polybia* también de la subfamilia *Polistinae* endémico de la ecozona Neotropical (parte sur de México y América del sur) construye nidos utilizando la llamada arquitectura *phragmocytarous*. Consiste en la construcción del nido a base de módulos, cada uno contiene un peine de celdas en conjunto con una envoltorio simple que lo cubre. Cada envoltorio sirve como base para el siguiente módulo, permitiendo así el crecimiento del nido y de la colonia (Hozumi et al, 2005).

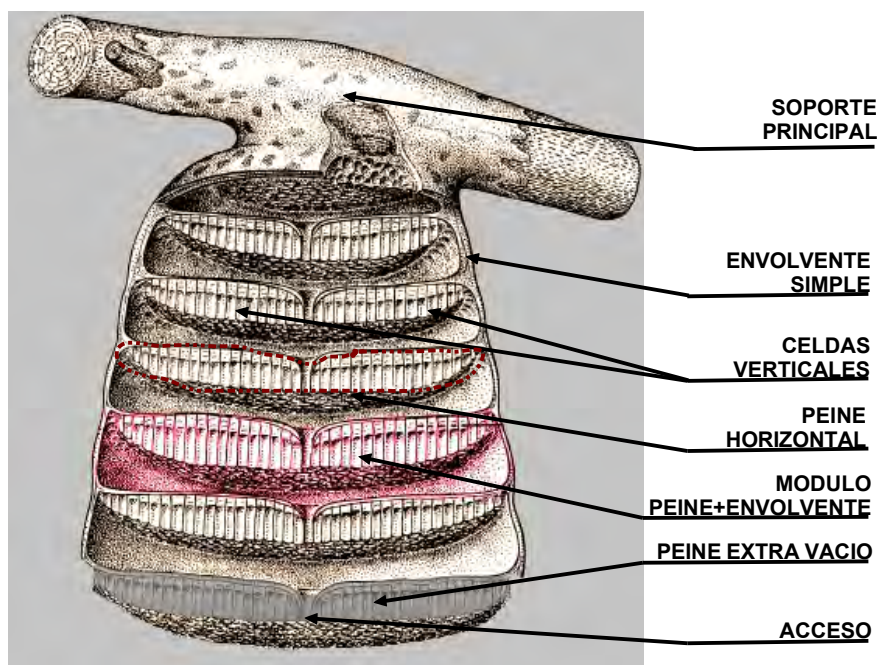


Figura 5.61: Nido de *Chartegus Chartarius*, arquitectura típica phragmocytarous. Imagen base: Jeanne, 1975. Nótese el peine extra con celdas vacías.

Se realizaron investigaciones sobre las cualidades térmicas de este tipo de estructuras en el Distrito Ribeirão Preto (21°11'S, 47°48'W), en São Paulo, Brazil. La primera se efectuó en verano (febrero) con dos especies, *P. paulista* y *P. occidentalis* (Hozumi et al, 2005), realizando mediciones con el nido ocupado y vacío, para poder estimar las ganancias o pérdidas térmicas generadas por la colonia.

Se concluyen que las especies observadas poseen pocas habilidades para regular el espacio de forma activa, es decir el calor generado o disipado por los habitantes no resulta relevante en los resultados. Durante el verano el interior es más fresco durante el día y más cálido por las noches. Por otro lado los factores que mayor contribuyeron a la regulación térmica del nido fueron la selección del sitio y el tipo de arquitectura *phragmocytarous* que promueve el aislamiento (Hozumi et al, 2005).

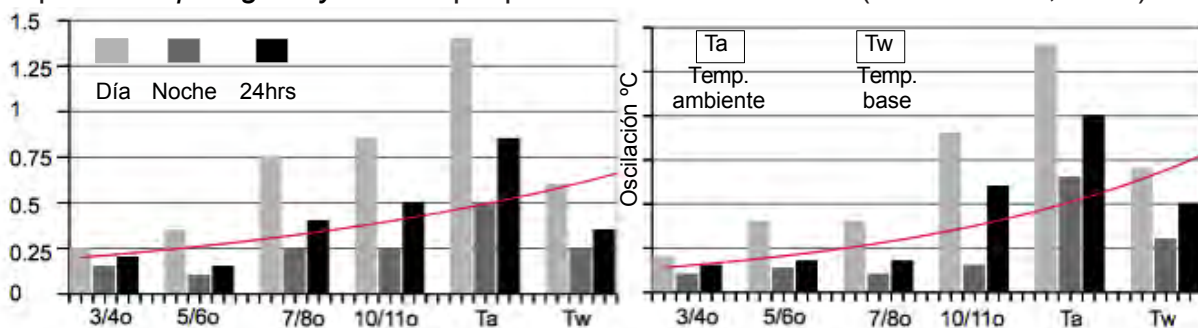


Figura 5.62: Oscilación térmica en °C en nido de *P. paulista* de día, noche y 24hrs, durante 1 día (febrero de 2002). Izquierda: Nido habitado. Derecha: Nido vacío. Los puntos 3/4o se encuentran más profundamente y los 10/11o más cerca del acceso al nido. Se observa una oscilación menor a 0.5 °C en promedio, menor oscilación en las partes más profundas y mayor oscilación en las partes más cercanas al exterior. Fuente: Hozumi et al, 2005.

A pesar de que ambas investigaciones muestran periodos de medición muy cortos resulta útil que se realizaran en periodos distintos. El segundo estudio se llevó a cabo durante el invierno (julio) para la especie *P. occidentalis* con los nidos ocupados. Según reporta el estudio las construcciones de este tipo de avispas utilizan el sistema de módulos con envolvente simple, pero agregan un peine extra con celdas vacías (figura 5.61) (Hozumi et al., 2008), una especie de diseño intermedio entre la estrategia de la envolvente funcional de los nidos *Polistinae* y la envolvente multicapa de las construcciones *Vespinae*.

Se realizaron mediciones de la temperatura interna en varios puntos del nido, con el peine extra y después removiéndolo para poder observar el efecto térmico. Los resultados mostraron por un lado ser consistentes en cuanto a que las estrategias activas de los habitantes para regular la temperatura son despreciables. Y segundo que el peine extra realiza las funciones de una envolvente aislante en particular en los puntos más internos del nido (Hozumi et al., 2008).

Comparando ambos estudios se observa en los resultados que en el espacio interior posee menor amplitud térmica en contraste con la temperatura ambiente. Que la arquitectura a partir de módulos y el peine extra promueven que en los puntos más internos las condiciones térmicas sean más estables.

iii. Arquitectura del nido con envolvente multicapa.

Vespinae, desarrolla sus construcciones contenidas en envolventes multicapa de, las cuales en muchas ocasiones están a su vez ubicadas dentro de cavidades, por lo que es posible almacenar el calor generado dentro del nido. En climas más adversos donde el efecto aislante de la envolvente no es suficiente se han observado nidos subterráneos (Hozumi et al., 2005).

El aislamiento a partir de aire atrapado es similar al mecanismo del plumaje al prevenir el intercambio convectivo entre el aire exterior y la superficie de la piel. El uso de la envolvente parece trascender las condiciones locales, ya que aparece en nidos estructurados en ramas o arbustos tanto como en cavidades enterradas, en zonas Europeas o de los Estados Unidos. Sin embargo se reporta que en los trópicos donde el aislamiento es menos relevante, los trabajadores no ocupan demasiado tiempo en la cubierta exterior (Gould y Grant, 2007).

El investigador Kojima presenta un estudio donde realizó mediciones de temperatura en un nido abandonado de la especie *Vespa simillima xanthoptera* en el área central de Japón durante febrero de 1996 (finales de otoño y principios de invierno). Donde muestra amplitud de 4.6° menor al interior del nido en comparación con la temperatura ambiente, lo que atribuye al efecto aislante de las varias capas de la envolvente, según reporta para *V. simillima* pueden ser de 20 a 95mm de espesor, menor en las capas laterales y mayor en el fondo (Kojima, 1993).

En un estudio posterior con la especie *V. crabro* se considera que es claro el efecto aislante del nido sin embargo no posee capacidades de retraso térmico, por lo que la selección del sitio dentro de una cavidad particularmente subterránea permite lograr la inercia térmica (Klingner et al., 2006).

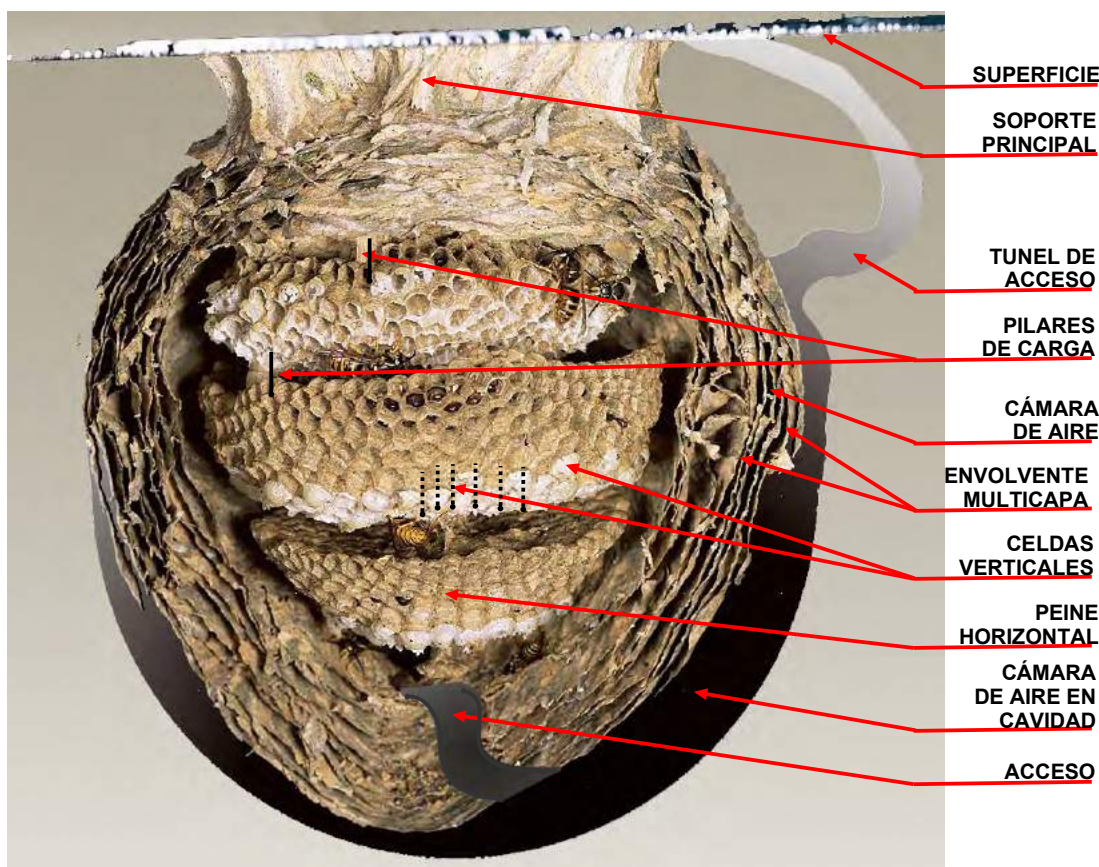


Figura 5.63: Nido multicapa de *Vespa crabro*. Imagen base: warrenphotographic.co.uk.

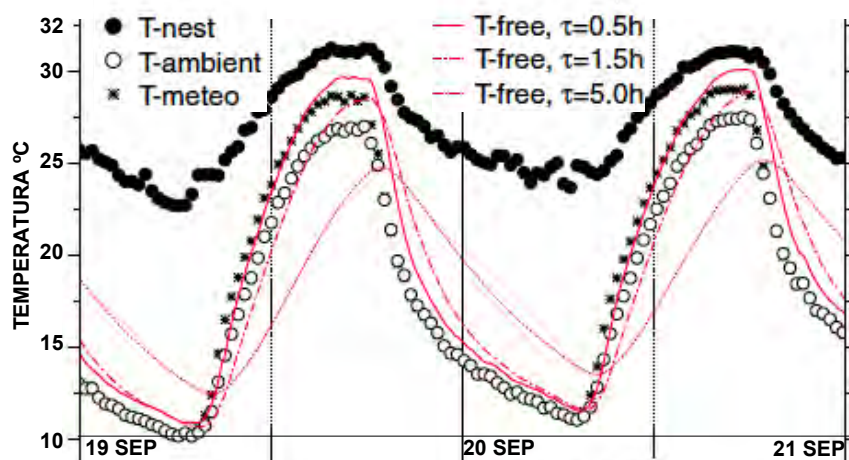


Figura 5.64: Temperaturas al interior del nido de la especie *Vespa crabro*, Klingner et al, 2006. Puede observarse que la oscilación térmica es menor al interior del nido en comparación con la temperatura ambiente, aunque no se observa desfase entre ellas.

VII. Uso de los materiales.

Como sucede en las construcciones humanas la selección de los materiales que componen la envolvente del nido determinan en buena medida el flujo térmico. En el caso de los nidos de papel de las avispas, las investigaciones reportan que las avispas prefieren el uso de madera en descomposición ya que requiere de menor gasto energético para obtener las pequeñas piezas con las que forman la envolvente (McGovern et al, 1988).

De igual forma que las termitas, las avispas al masticar las fibras de madera agregan su saliva lo que le da propiedades impermeables. Debido a que utilizan una amplia variedad de especies para obtener las fibras, el color resultante es muy variado. Desde el blanco hasta el gris o tonos pardos desde el café claro al oscuro (McGovern et al, 1988).

Propiedades del "papel"				
Muestra	Calibre mm	Densidad gr/cm ³	Organismo	Especie arbórea
Envolvente	0.114	0.380	Dolichovespula maculata	Sauce y Alamo
Envolvente	0.100	0.350	Desconocida	Sauce (<i>salix sp</i>)

Tabla 5.4: Algunas propiedades del papel de las avispas en sus construcciones. Fuente: McGovern et al, 1988.

Una investigación complementaria considera que en la arquitectura de las avispas se aprovecha que el calor viaja de forma más lenta a través del aire atrapado entre las capas de la envolvente que de las láminas de papel que la componen. Sin embargo reporta valores de conductividad del papel similares a materiales aislantes o a los encontrados en los nidos de las aves (Schmolz et al, 2000).

Propiedades térmicas de distintos materiales				
Material	Calor específico (J/Kg grado °C)	Densidad Kg/m ³	Conductividad térmica (W/m grado °C 10 ⁻³)	Especie
Envolvente de papel	1,210.00	380.000	80	<i>Vespa Crabro</i>
		350.000	200	
Madera ligera	1,386.00	510.00	100	Abeto
Madera normal	1,210.00	600.00	140	Pino
Madera pesada	1,255.00	800.00	210	Roble

Tabla 5.5: Propiedades térmicas de distintos materiales. El calor específico del papel se consideró un valor intermedio y similar al de la madera, como el utilizado por Klingner et al, 2006. La densidad es la que reporta McGovern et al, 1988. y la conductividad térmica se obtuvo de Schmolz et al, 2000 para el nido de *V. Crabro*. Como puede observarse la conductividad de la envolvente se encuentra en un rango similar al de la madera ligera y la pesada.

El papel de la envolvente cumple con las características propias de los cerramientos aislantes, estos poseen baja conductancia, baja densidad, baja capacidad calorífica y alta porosidad, como el poliestireno o el poliuretano. Un cerramiento aislante se enfría o se calienta con facilidad pero solo en la cara expuesta a los cambios térmicos. Sin embargo como se indica en el estudio de Klingner et al, 2006 el nido no posee inercia térmica.

Propiedades térmicas de distintos materiales			
Material	Calor específico (J/Kg grado °C)	Densidad Kg/m ³	Conductividad térmica (W/m grado °C 10 ⁻³)
Gases			
Aire	1,180.00	1.20	26-30
Aislantes			
Poliestireno Exp	1,700.00	30.00	33
Fibra de Vidrio	650.00	100.00	42
Triplay	1,400.00	560.00	140
Tierra vegetal	920.00	1,800.00	1800
Mampostería			
Ligera	900.00	1,600.00	560
Mediana	920.00	1,800.00	730
Concreto			
Agregado ligero	1,000.00	1,800.00	720
Agregado medio	1,000.00	2,200.00	1200

Tabla 5.6: Propiedades térmicas de algunos materiales. Nótese que en comparación los valores de la envolvente de papel están mas cercanos a los materiales aislantes. Tanto el calor específico, la densidad como la conductividad térmica, se encuentran en rangos entre la fibra de vidrio y el triplay. Fuente, NOM-008-ENER-2001.

Los cerramientos que poseen inercia térmica son por el contrario de un gran espesor, elevada capacidad calorífica y una conductividad media (entre 0.5 y 2.0 W/m °C), como la mampostería o la tierra (Olgay, 2010).

Tiempos de inercia térmica			
Material	Espesor en Centímetros	Valor de (U) Cal/cm ² /min	Retraso en Horas
Piedra	20	0.0031	5.5
	35	0.0025	8
Concreto	15	0.0034	3.8
	20	0.003	5.1
Ladrillo común	10	0.0028	2.3
	20	0.0019	5.5
Panel aislante	5	0.00065	0.77
	10	0.00037	2.7

Tabla 5.7: Coeficiente de transmisión calorífica total (U) y tiempos de inercia térmica característicos para muros homogéneos. "U" es el coeficiente de transmisión total de calor, a menor valor de "U" mejor el efecto aislante. Fuente: Olgay, 2010.

El papel de la envolvente y los peines que contienen las celdas, se encuentran colgando con la abertura hacia abajo (a diferencia de las abejas sin aguijón). El papel esta compuesto casi en su totalidad de celulosa, uno de los compuestos orgánicos electrostáticos que posee una enorme atracción con el agua que puede subir verticalmente por capilaridad a través del papel, es por esto que la humeada de las larvas no permite que caigan por gravedad, (Gould y Grant, 2007).

VIII. Otros materiales.

Dentro del género *Polybia* existe una especie entre solo unas cuantas que no utiliza papel para construir sus nidos, la *P. spinifex* utiliza barro como el principal material de construcción. Las investigaciones sobre las características térmicas de este tipo de nidos reportan que el material está constituido por barro o arcilla mezclado con partículas de arena y que el coeficiente de conductividad es tres veces más grande que en el caso del papel (510 y 560 W/m grado $^{\circ}C^{10^{-3}}$), estos valores son cercanos a los de la mampostería (Hozumi et al., 2009).

Las mediciones de temperatura aunque solo se realizaron para dos días durante el otoño, mostraron que la oscilación térmica es muy grande, de $22^{\circ}C$, incluso mayor que la que se presenta en la temperatura ambiente que fue de $17^{\circ}C$ (Hozumi et al., 2009). También se aprecia que no tiene cualidades de retraso térmico, seguramente el espesor de tan solo $4mm$ no permite almacenar el calor. Los autores atribuyen estas pobres cualidades térmicas a la alta conductividad del material y a que es posible que un nido más resistente a ataques de depredadores (vertebrados) y a las fuertes lluvias fuera un factor de mayor peso en la supervivencia de la especie, que los pesares térmicos (Hozumi et al., 2009).

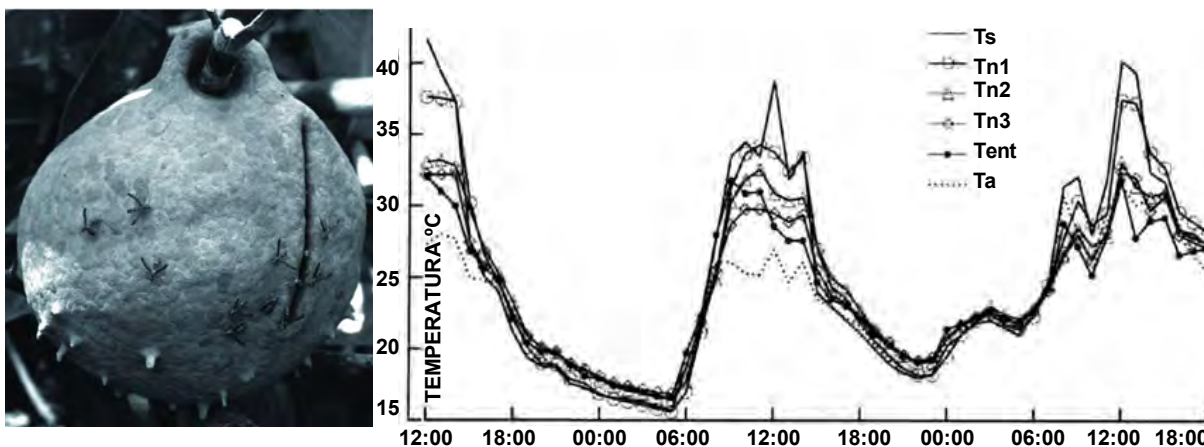


Figura 5.66: Nido de *Polybia spinifex* y medición de temperaturas del 4-6 de septiembre (otoño) de 2004, de 12:00 a 18:00hrs. Realizado en Hitachi ($36^{\circ}34'$ N, $140^{\circ}38'$ E), Ibaraki, Japón. **Ts**: temperatura superficial, **Tn1 a Tn3**: temperaturas interiores de la parte alta, intermedia y baja del nido. **Tent**: temperatura de la entrada, **Ta**: temperatura ambiente. El nido recibía luz directa de las 5:50am a las 18:10 pm Fuente: Hozumi et al., 2009.

La investigación de Ishay y Barenholz-Paniry sobre la especie *Vespa orientalis* muestra una estrategia de regulación térmica basada en las propiedades termoeléctricas de la seda que utilizan esta las avispas para construir una tapa de cada una de las celdas. Esta puede almacenar energía en forma de carga eléctrica y disiparla en periodos fríos en forma de calor, según Jones y Oldroyd este mecanismo es único (Jones y Oldroyd, 2007) (Ishay y Barenholz-Paniry, 1995).

IX: Interpretación bioclimática.

Las estrategias tanto pasivas como activas reportadas en las construcciones de las avispas son similares a las vistas en los distintos grupos de abejas, es probable que esto se deba a que se considera que las hormigas y abejas descienden de las avispas (Gould y Grant, 2007).

En este caso también se reportan 3 estrategias pasivas generales, el uso de cavidades como emplazamiento, la construcción de una envolvente y la ubicación de las incubadoras en las partes más aisladas térmicamente. De igual forma el uso de los materiales tiene un desempeño destacado.

En cuanto a las cavidades se aprovecha el uso de un material aislante como la madera en un tronco hueco o uno con alta capacidad calorífica e inercia térmica como es el terreno natural.

En cuanto a la construcción de la envolvente se presentan tres variaciones, la envolvente funcional, la envolvente simple y la multicapa. Aquí la principal diferencia con las construcciones de las abejas esta en el uso de los materiales. El papel como material aislante en combinación con variaciones en el uso de cámaras de aire.

La envolvente funcional utilizada en los nidos expuestos del género *Polistinae* según las investigaciones (Hozumi y Yamane, 2001) se basa en una envolvente perimetral que aumenta la capacidad de retener el calor debido a cámaras de aire abiertas, en combinación con una mayor longitud de estas para reducir el efecto convectivo, resultando en una geometría ovoidal, donde en forma similar a la abejas ubican las incubadoras al centro. En contraste las construcciones de las abejas utilizan los depósitos de alimento, que debido a sus propiedades similares a las del agua aprovechan la inercia térmica.

La envolvente simple destaca ya que se muestra en la estructura a partir de módulos, en la llamada arquitectura *phragmocytarous*, además de permitir un crecimiento progresivo se observan que los módulos funcionan a su vez como cámaras de aire para el anterior. El mecanismo se refuerza en los ejemplos donde se agrega un módulo extra vacío como los presentados por Hozumi et al., (2008).

La última variación es la envolvente multicapa que aprovecha las cámaras de aire atrapado entre ellas y las suma de la resistencia térmica de cada una de las capas de papel.

El amortiguamiento y el retardo térmico pueden considerarse en términos del control del flujo de calor como propiedades aislantes. Steven Szokolay distingue tres mecanismos.

El aislamiento reflectivo, resistivo y el capacitivo. El primero es aquel que inhibe el flujo de calor radiante, como el que se presenta en las cavidades como áticos, buhardillas y plafones. Cuando la temperatura exterior es mayor a la interior el flujo de térmico se presentan hacia el interior de la cavidad mediante la radiación de calor de la losa. Aquí se recomienda un aislante reflectivo como una lámina de aluminio debido a sus bajos valores de emitancia y absortancia (Szokolay, 2008).

El aislamiento resistivo considera que el aire es uno de los materiales comunes con menor valor de conductividad, en particular si se encuentra quieto, ya que los movimientos convectivos si promueven el flujo térmico. El objetivo del aislamiento resistivo es minimizar estos movimientos creando pequeñas cámaras de aire. Los materiales aislantes más efectivos son aquellos que poseen aire atrapado como el poliestireno (Szokolay, 2008). Las estrategias de las construcciones reportadas en las avispa a partir de aire atrapado se valen del aislamiento resistivo, tanto en las cualidades del papel como en las cámaras de aire de los módulos *phragmocytтарous* o en las del aire atrapado en la envolvente multicapa.

El aislamiento capacitivo es aquel que modifica la inercia térmica de los cerramientos, es decir su propagación en el tiempo. A diferencia del aislamiento reflectivo y resistivo que reaccionan de forma instantánea al flujo de calor, el capacitivo se basa en demorar la reacción (Szokolay, 2008). La combinación de los materiales aislantes como el papel y una cavidad subterránea se basan en agregar las propiedades del aislamiento capacitivo. En el caso de la arquitectura de las abejas se observa en la capa funcional formada por los depósitos de miel o polen, de ahí que en las mediciones se observe un desfase en la propagación del calor.

6.- Estrategias de climatización pasiva encontradas en la muestra de estudio. Fichas sintéticas y estrategias similares en la arquitectura.

6.1.- Orientación – Termitas (*Amitermes meridionalis*).

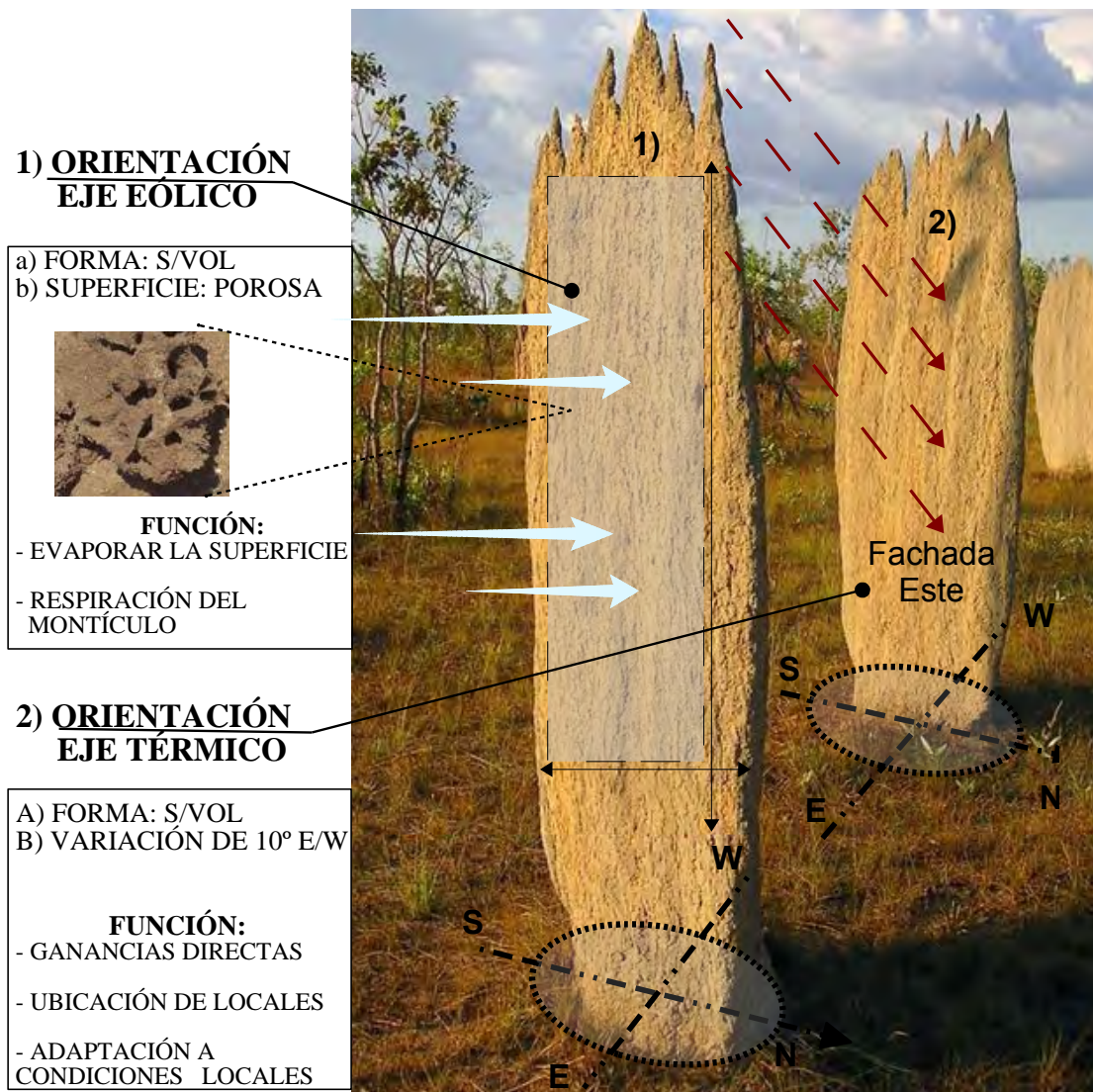


Figura 6.1: Síntesis de estrategias de climatización para *Amitermes meridionalis* reportadas en la bibliografía citada. Imagen modificada a partir de ozanimals.com, imagen de NeilsPhotography.

A pesar de que en la bibliografía consultada no se menciona el uso de la inercia térmica a través de la masa proporcionada por la tierra que se utiliza como material de construcción, se puede considerar a todo el montículo como un muro de 0.50 mts. de espesor basándose en las medidas reportadas (Jacklyn, 1992), por lo que el retardo térmico podría ser ejemplificado mediante la siguiente gráfica.

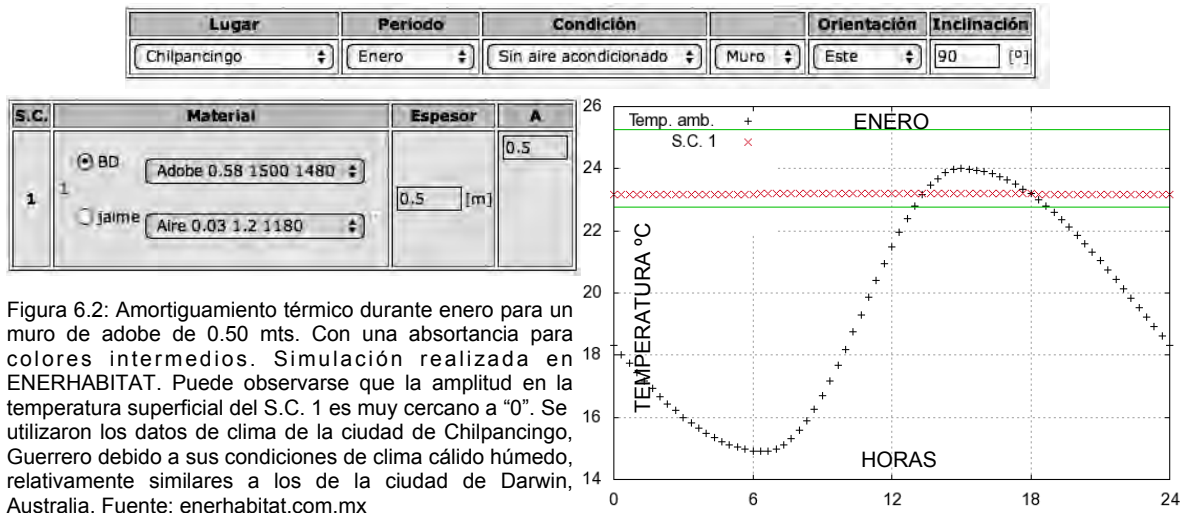


Figura 6.2: Amortiguamiento térmico durante enero para un muro de adobe de 0.50 mts. Con una absorción para colores intermedios. Simulación realizada en ENERHABITAT. Puede observarse que la amplitud en la temperatura superficial del S.C. 1 es muy cercano a “0”. Se utilizaron los datos de clima de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero debido a sus condiciones de clima cálido húmedo, relativamente similares a los de la ciudad de Darwin, Australia. Fuente: enerhabitat.com.mx

I. Estrategias similares en la arquitectura.

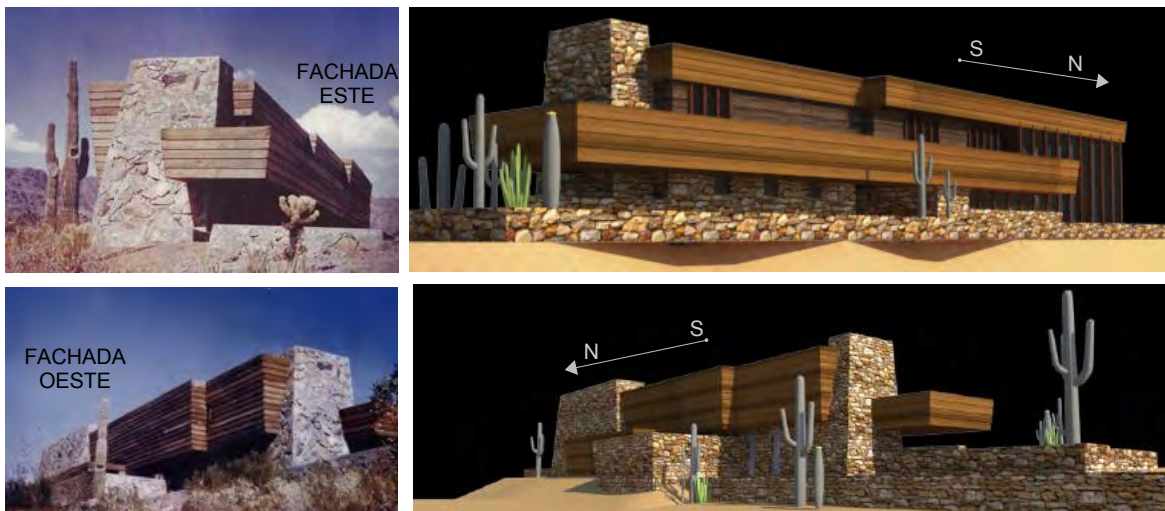


Figura 6.3: Casa Rose Pauson, Phoenix, Arizona, Frank Lloyd Wright. En este caso el diseño alargado responde a un eje térmico, los espacios se abren a la fachada Este, mientras que la fachada Oeste se observa un mayor uso de la masa térmica. Fuente: Izquierda, imágenes de <http://en.wikiarquitectura.com>. Derecha, modelo tridimensional tomado de <http://sketchup.google.com/3dwarehouse>.



Figura 6.4: Construcciones destinadas al almacenamiento de alimentos, puede observarse el uso de la porosidad de las superficies para permitir la disipación de la humedad al interior. En los extremos se muestran hórreos tradicionales de la península Ibérica, en estos podría utilizarse la masa térmica de los muros en combinación con la porosidad. Al centro se muestra un granero tradicional de la villa de Sade en Indonesia, en este caso la porosidad del material no posee cualidades de retardo térmico. Fuente: Extremos, wikipedia.org. Centro, contemporarynomad.com.

6.2.- Ventilación – Termitas (*Macrotermes michaelseni*).

1) VENTILACIÓN FASE INICIAL

MONTÍCULO

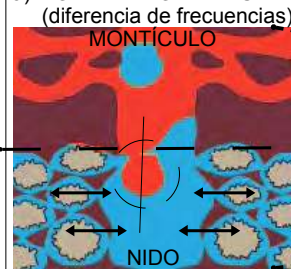
- a) GRADIENTE DE PRESIÓN
- b) FORMA: CIRCULAR (360°)
- c) SUPERFICIE: POROSA



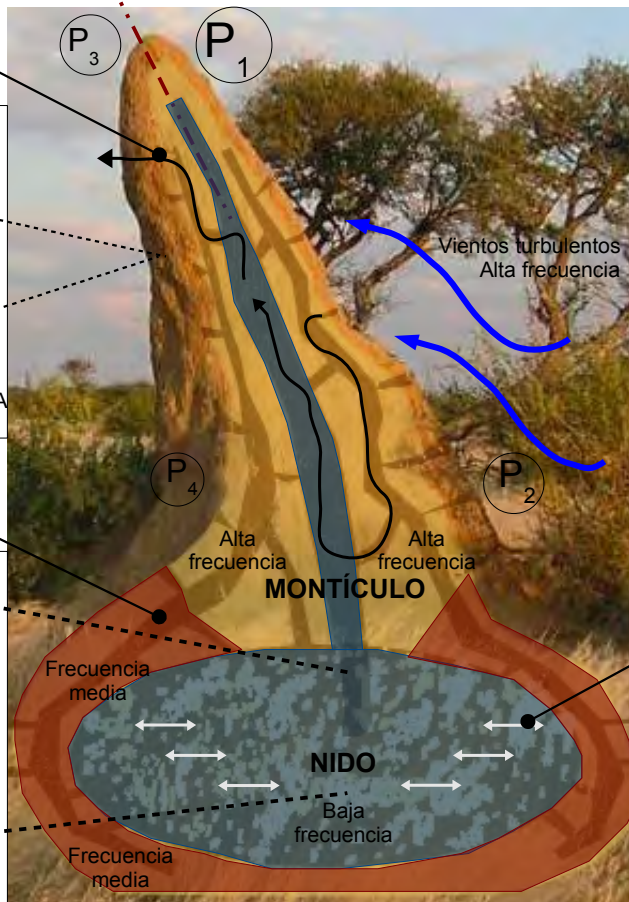
- d) ARQUITECTURA INTERNA
- e) POSIBLEMENTE PROMOVIDA POR LA ORIENTACIÓN

2) VENTILACIÓN FASE INTERMEDIA

a) MOVIMIENTO PENDULAR (diferencia de frecuencias)



b) MEZCLA ACÚSTICA



3) VENTILACIÓN FASE FINAL

- NIDO
- MOV. HORIZONTAL (a)
- DIFUSIÓN (b)
- POCO VOLUMEN (c)

Figura 6.5: Síntesis de estrategias de climatización para *Macrotermes michaelseni* reportadas en la bibliografía citada. Imagen modificada a partir de Grohmann, 2010.

Como estrategia complementaria que no se menciona en la bibliografía, es posible que la constante humedad que se encuentra en la superficie del montículo debido a la reparación continua produzca un enfriamiento evaporativo directo e indirecto y por tanto gradientes de temperatura en las diferentes caras.

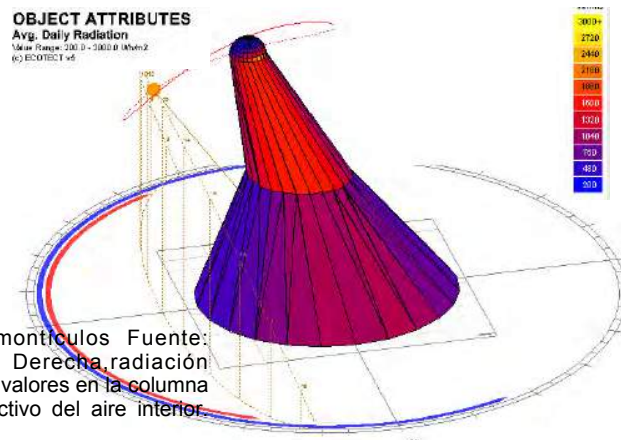
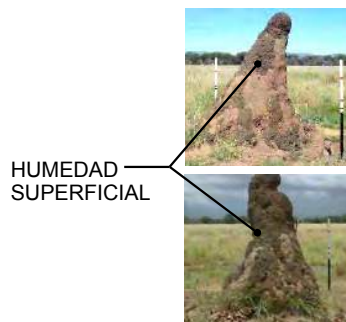


Figura 6.6: Izquierda, humedad superficial en montículos Fuente: esf.edu/efb/turner/termitePages/termiteMain.html. Derecha, radiación superficial promedio en montículo, se observan mayores valores en la columna superior lo que podría promover el movimiento convectivo del aire interior. Fuente: Análisis realizado en Autodesk Ecotect 2011.

I. Estrategias similares en la arquitectura.

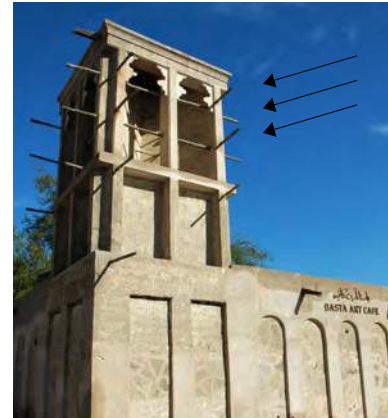
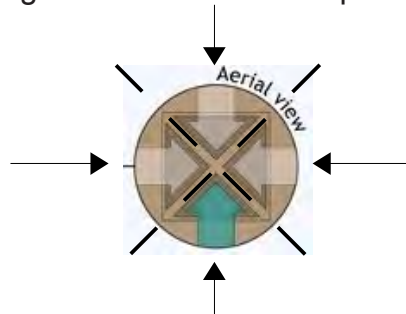


Figura 6.7: Torre de viento Irani. La disposición en cruz de los muros interiores permite aprovechar el viento en varias direcciones. Fuente: Imagen modificada en base a <http://johnkaisercalautit.wordpress.com>.

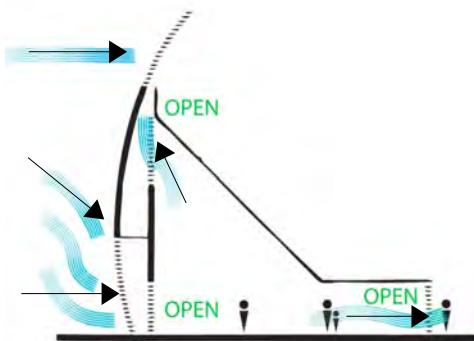


Figura 6.8: Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou, Renzo Piano. La ventilación se consigue por medio de un gradiente de presión vertical y la utilización de una envolvente que permite el paso del viento. Izquierda, diagrama de ventilación, Fuente: Imagen modificada en base a pzarch14.wordpress.com. Derecha, envolvente exterior, Fuente: <http://inhabitat.com/>

6.3.- Ventilación – Hormigas (*Atta*).

1) VENTILACIÓN SUPERFICIAL

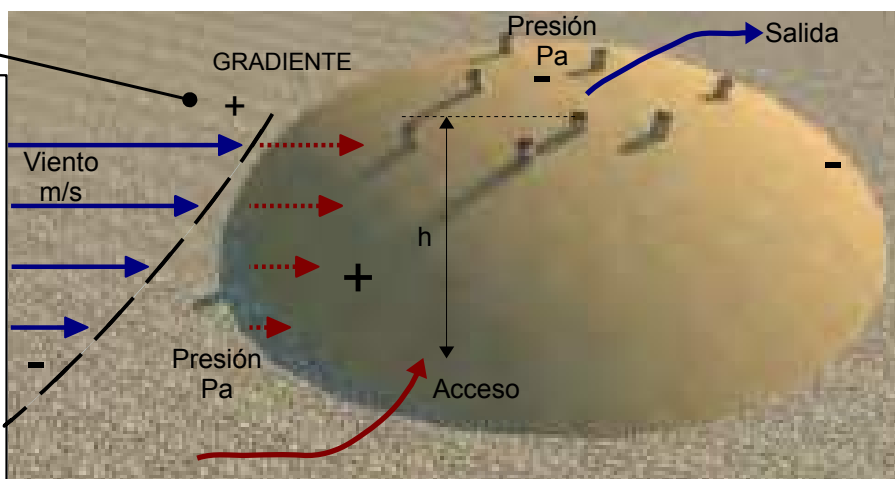


Figura 6.9: Síntesis de estrategias de climatización para *Atta leavigata* reportadas en la bibliografía citada.

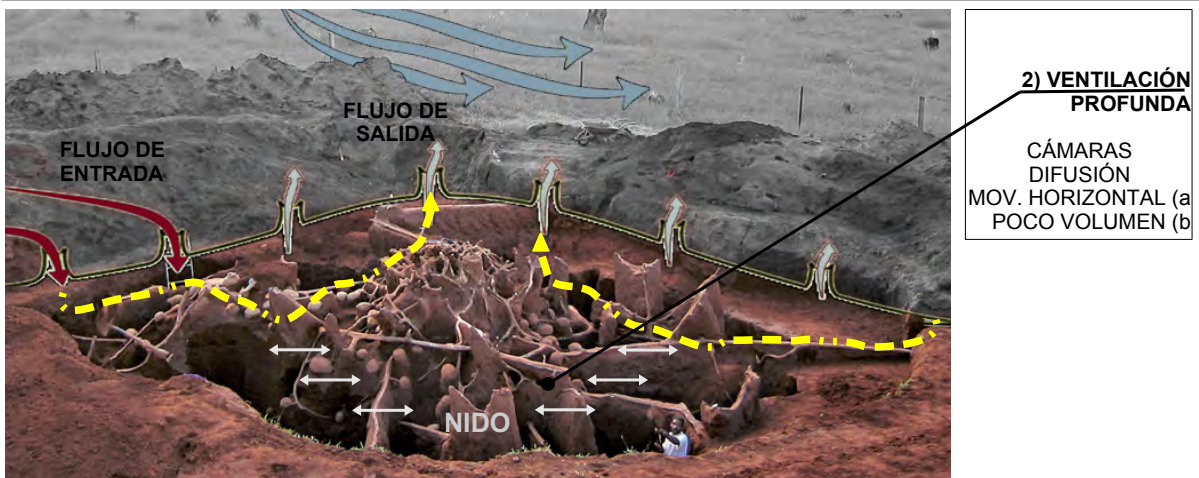


Figura 6.10: Síntesis de estrategias de climatización para *Atta leavigata* reportadas en la bibliografía citada. Imagen modificada a partir de Bollazzi et al., 2012.

Entre los mecanismos no mencionados, es probable que se presente un enfriamiento conductivo tierra – aire en los largos ductos que componen el nido. Y debido a la forma de cúpula del montículo también es muy posible que se presenten gradientes de temperatura en caras opuestas, debido al asoleamiento irregular.

I. Estrategias similares en la arquitectura.

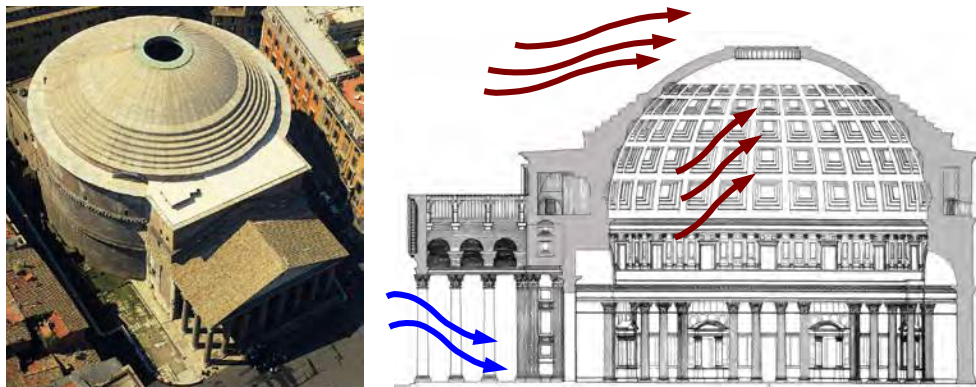


Figura 6.11: Ventilación natural del Panteón de Agripa, Roma, Italia. Izq. Vista aérea, fuente: noverthought.tumblr.com Der. Sección transversal, fuente: <http://www.arch.mcgill.ca>. Si bien el óculo central de la cúpula tenía la función de iluminar los altares internos, también promueve la ventilación por diferencias de presión.



Figura 6.12: Albergues a partir del sistema "superadobe" de Nader Khalili. Estas construcciones aprovechan la inercia térmica de la tierra. El enfriamiento convectivo que producen los vientos sobre la envolvente y la salida del aire caliente al interior por medio de la estratificación térmica. Fuente: <http://calearth.org>

6.4.- Termorregulación – Abejas (*Apis mellifera* y *Meliponini*).

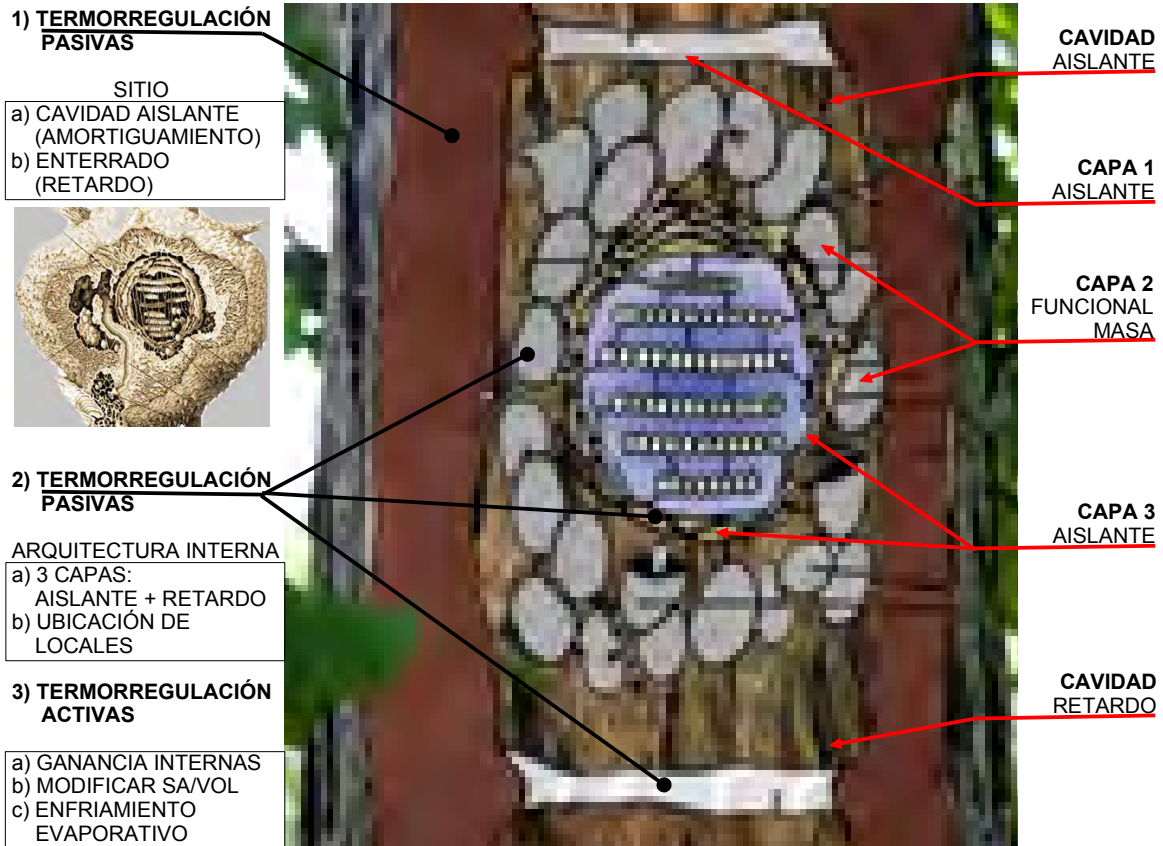


Figura 6.13: Síntesis de estrategias de climatización reportadas en la bibliografía citada, a partir de un nido de abejas *Meliponini*. Imagen basada en encyclopedie-universelle.com.

La capa indicada con el número 3, el involucrum se menciona que presenta un papel destacado en la regulación del ambiente térmico (Sung, et al. 2008) lo que no se indica en ninguna de las bibliografías consultadas es la posible existencia de aire atrapado en las múltiples capas de este material.

I. Estrategias similares en la arquitectura.



Figura 6.14: Izquierda: Muros de agua en viviendas en Nuevo México, Steve Baer. Fuente: www.batiactu.com. Derecha: Hórreo tradicional, España. Se observa que en todo el perímetro se cuelgan mazorcas del maíz cosechado para almacenarlas. Fuente: flickr.com, fotografía de Jose Maria Fernandez Rodrigo. En ambos casos se expone el uso de la masa térmica en alguna parte de la envolvente.

6.5.- Termorregulación – Avispas (*Polistinae* y *Vespinae*).

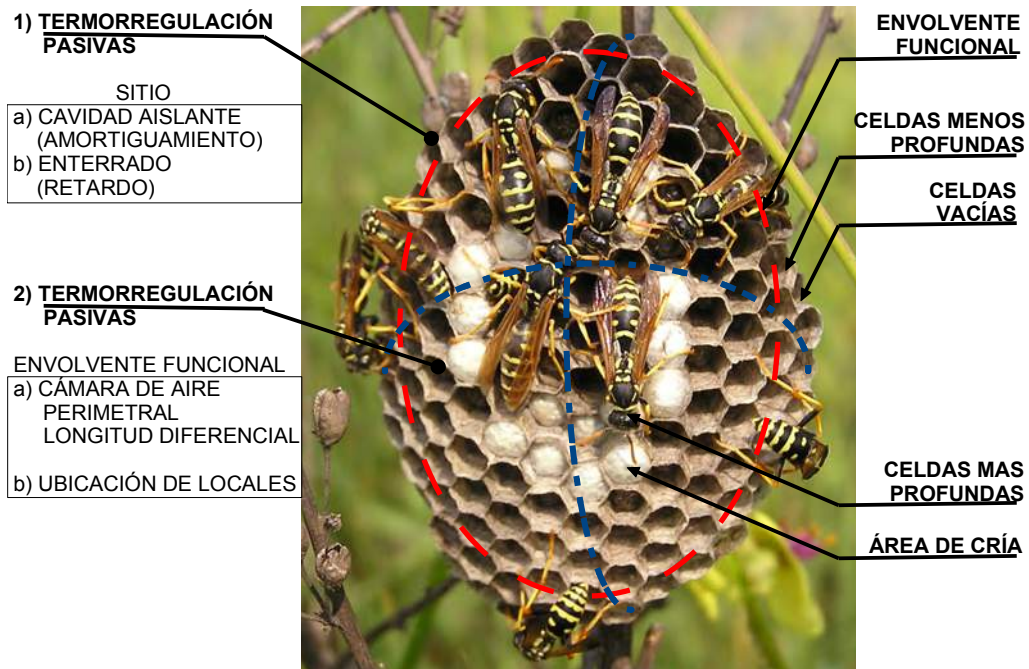


Figura 6.15: Síntesis de estrategias de climatización reportadas en la bibliografía citada, a partir de un nido expuesto de *Pollistes gallicus*. Imagen modificada con base en encyclopedie-universelle.com.

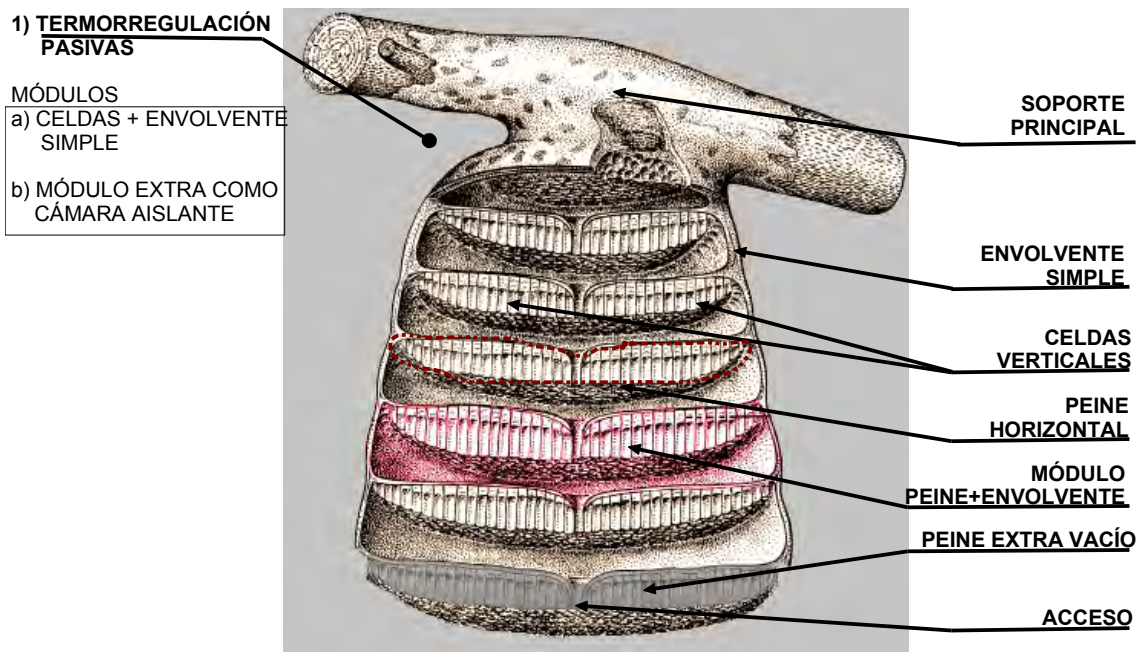


Figura 6.16: Síntesis de estrategias de climatización reportadas en la bibliografía citada, con base en un nido con arquitectura *phragmocytarous*. Imagen modificada a partir de Jeanne, 1975.

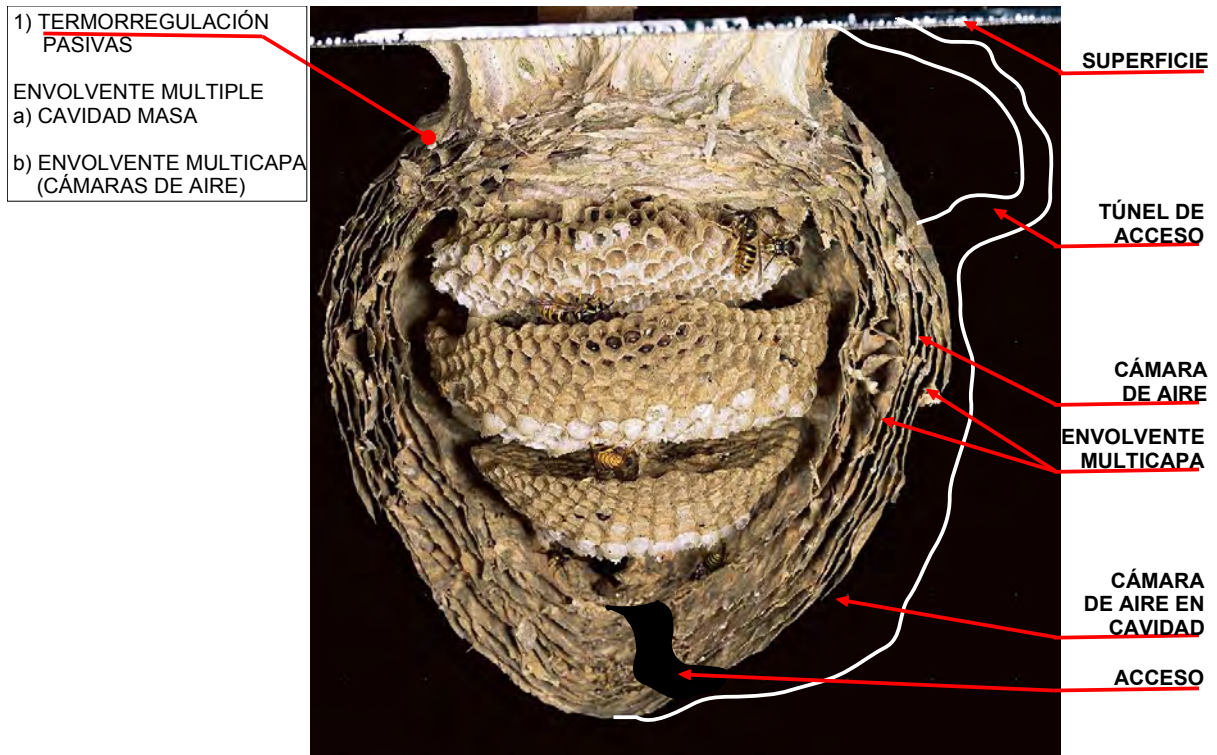


Figura 6.17: Síntesis de estrategias de climatización reportadas en la bibliografía citada, a partir de un nido multicapa de la especie *Vespa crabro*. Imagen modificada a partir de warrenphotographic.co.uk.

I. Estrategias similares en la arquitectura.

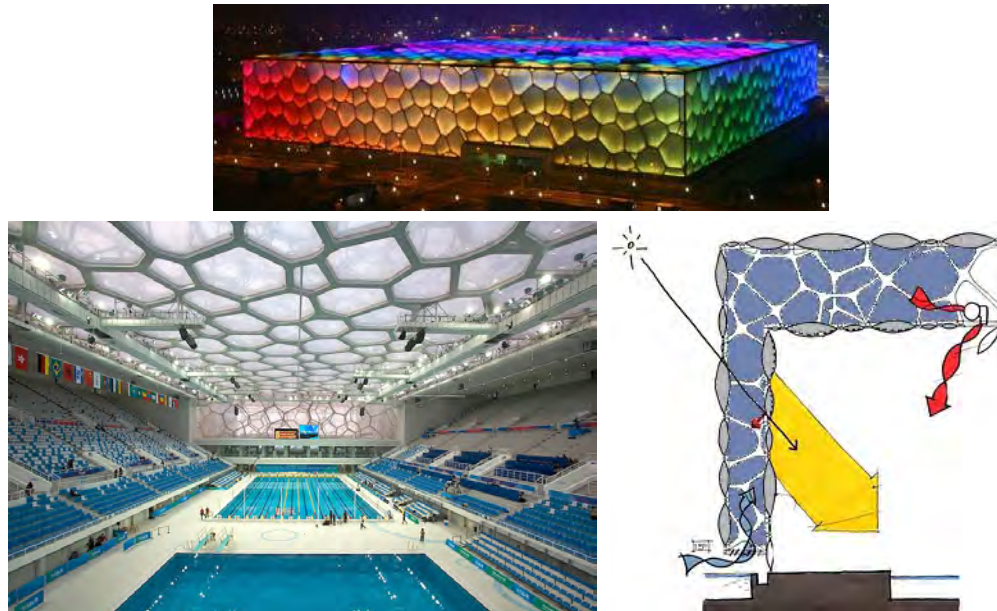


Figura 6.18: Envoltura del National Aquatics Center (Watercube), Beijing, PTW Architects. Formada por una doble fachada a base de Ethylene tetrafluoroethylene, ETFE. Y una cámara aislante a base de aire. Izquierda: Corte esquemático, 1) Entrada de aire fresco. 2) Célula traslúcida de ETFE (efecto invernadero). 3) Iluminación natural y calentamiento pasivo. 4) Mecanismo para oscurecer la fachada. 5) Extractor mecánico para inyectar aire precalentado en la envoltura. Fuente: continuingeducation.construction.com. Derecha: Interior del centro acuático. Fuente: ptw.com.au.

7.- Modelización de estrategias de los casos de estudio.

7.1.- Ubicación de las construcciones animales en la matriz de estrategias de climatización pasiva en función de los mecanismos de transferencia de calor.

El diseño bioclimático es uno de los acercamientos para reducir el costo energético de los edificios. El diseño permite reducir el estrés producto de las variaciones del clima y por tanto reducir el consumo de energía para enfriamiento o calentamiento basado en el uso de “energía natural” del sitio. Según Watson y Labs el diseño climático puede ser entendido desde la perspectiva de los flujos de energía térmica. Por ejemplo el confort puede ser abordado como el balance de energía térmica entre las personas y el espacio circundante (Watson y Labs, 1983).

Los flujos de energía térmica se rigen por tres principios físicos la conducción, la convección y la radiación. Y un cuarto, la evaporación se incluye entre estos procesos debido al intercambio de energía que se produce en los cambios de fase de la materia. De manera general pueden presentarse dos situaciones a lo largo del año, un periodo de bajo calentamiento (invierno) y un periodo de sobre calentamiento (verano). En el primero las estrategias de diseño climático serán el promover las ganancias térmicas y evitar las perdidas. En el segundo periodo cuando el enfriamiento es deseable los objetivos del diseño climático serán por el contrario evitar las ganancias y promover las perdidas térmicas (Watson y Labs, 1983).

Según Gould y Grant la regulación térmica del nido se promueve de forma general en dos formas, procurar un espacio templado o por el contrario promover el enfriamiento, por ejemplo el enfriamiento evaporativo observado en especies de abejas o avispas. O el aislamiento de la envolvente que permite reducir la oscilación térmica (Gould y Grand, 2007). A continuación se muestra la matriz de estrategias de control climático en función de los mecanismos de transferencia de calor (Watson y Labs, 1983) para los 5 casos de estudio presentados anteriormente.



Simbología de casos de estudio

Figura 7.1: Simbología de casos de estudio, de izquierda a derecha. (Elaboración propia) **Arriba:** Termitas: *A. Meridionalis*. Hormigas: *Atta Laevigata*. Avispas: *Polistinae*, *P. gallicus*. **Abajo:** Termitas: *Macrotermes michaelseni*, Abejas: *A. Mellifera* y *Meliponini*, Avispas: *Vespinae*. Eac: Estrategias activas de abejas y avispas (aleteo, enfriamiento evaporativo y “cluster heat”. También se considera la humedad superficial promovida por la construcción activa en las termitas *Macrotermes michaelseni*.

		CONDUCCIÓN	CONVECCIÓN	RADIACIÓN	EVAPORACIÓN
I N V I E R N O	Promover Ganancias			Promover Ganancias Solares (EAc) Orientación Inclinación Norte	
	Evitar Pérdidas	Minimizar el flujo conductivo de calor Masa térmica	Minimizar el flujo de aire al exterior	Minimizar la infiltración	
V E R A N O	Evitar Ganancias	Minimizar el flujo conductivo de calor Masa térmica	Minimizar la infiltración	Minimizar las ganancias solares Minimizar Cara Oeste	
	Promover Pérdidas	Promover el enfriamiento conductivo	Promover la ventilación (EAc) Porosidad Forma	Promover el enfriamiento radiante	Promover el enfriamiento evaporativo (EAc)

Figura 7.2: Matriz de estrategias de Control Climático en función de los mecanismos de transferencia de calor basado en: Watson, D & Labs K. *Climatic Design*, McGraw-Hill Book Co. New York. USA 1983. (Elaboración propia)

Para el período de bajo calentamiento, los mecanismos principales están basados en el uso de la inercia térmica de los materiales, en menor medida el uso de una envolvente aislante para evitar pérdidas y por último las ganancias solares por medio de la orientación. Para el período de sobre calentamiento, la masa térmica de los materiales es también la estrategia más utilizada para evitar ganancias. En segundo lugar una orientación adecuada para evitar las ganancias desde el poniente o promover la ventilación de la estructura por medio de una envolvente porosa, son los mecanismos sobresalientes.

La homeostasis es la tendencia de los sistemas vivos a mantener cierto estado de equilibrio. Este estado varía de organismo a organismo y depende de la presión que el medio ambiente ejerce. Puede referirse a una condición interna, como la regulación térmica del cuerpo o puede ser externa al organismo por ejemplo, los niveles de humedad en los nidos de termitas *M. michaelseni* (Turner, 2004).

La homeostasis social es un fenómeno observado en las colonias de insectos sociales donde las actividades de los habitantes promueven el equilibrio del ambiente interior (Turner, 2004). Jones y Oldroyd presentan una revisión de los mecanismos de regulación térmica del nido en especies de insectos sociales y la estructuran en dos categorías generales, pasiva y activa (Jones y Oldroyd, 2007).

La regulación del clima interior puede ser categorizada en términos de corto y largo plazo. La primera es una respuesta activa por parte de los habitantes a las condiciones del medio, como puede ser promover el enfriamiento evaporativo. La segunda esta relacionada con las medidas que afectan las condiciones interiores hasta el término del ciclo de vida de la colonia, como la ubicación y emplazamiento o las propiedades aislantes de la envolvente (Hozumi et al, 2005).

La regulación pasiva incluye la selección del sitio, la orientación que permite optimizar la temperatura interna, la arquitectura del nido que promueve el calentamiento o enfriamiento pasivo y la reubicación a espacios dentro del nido donde existan temperaturas más favorables. Estas estrategias tienen un impacto notable en el gasto energético que los individuos tendrían que invertir para regular la temperatura interna mediante mecanismos activos.

La regulación activa de la temperatura se refiere a comportamientos donde los habitantes modifican la temperatura interna mediante actividades físicas como la ventilación por aleteo o el enfriamiento mediante evaporación (Jones y Oldroyd, 2007). La siguiente tabla complementa junto con la matriz de estrategias anterior un resumen sintético de los principales mecanismos de climatización, en este caso la orientación, la arquitectura del nido y el emplazamiento.

INSECTO SOCIAL	TERMORREGULACIÓN PASIVA		
	Orientación	Arquitectura	Emplazamiento/ emigración
Hormigas	A	A	M
Abejas: <i>Melifera</i>	A	A	T
Abejas sin aguijón	?	M	T
Abejorros	A	T	T
Avispas: <i>Polistinae</i>	?	A	T
<i>Vespinae</i>	?	T?	T
Termitas	A	A	A

SIMBOLOGÍA	
A	Algunas especies
M	La mayoría de las especies
T	Todas las especies
N	Ninguna de las especies
*	No observado en todas las especies

Tabla 7.1: Sistemas de Termorregulación pasivos en diferentes grupos de insectos sociales. Fuente: Jones y Oldroyd, 2007.

7.2.- Diagramas sintéticos de estrategias por caso de estudio.

A continuación se muestra un resumen de los principales estrategias encontradas en los casos de estudio, por medio de diagramas. En conjunto con las matrices anteriores representan herramientas que permiten evidenciar los mecanismos esenciales detrás de cada función y realizar un análisis comparativo entre las estrategias. Es posible encontrar similitudes, diferencias, relaciones entre las partes y las funciones, las funciones y la condición climática, etc.

Las funciones aquí presentadas son aproximaciones incompletas para explicar cómo es que todas la partes interactúan entre sí. Sin embargo resulta útil presentar las construcciones y sus estrategias cómo sistemas para observar la interacción entre las diferentes cualidades para promover una o más funciones y por tanto regular el ambiente interior.

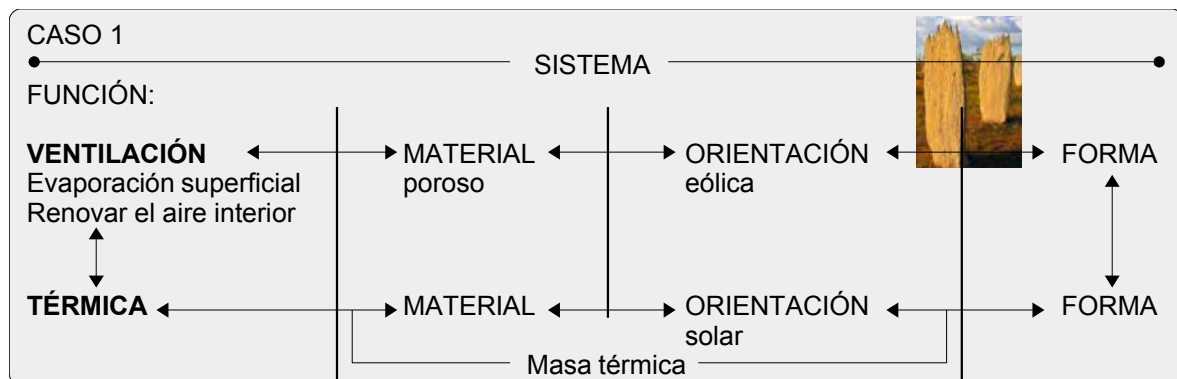


Figura 7.3: Diagrama sintético de estrategias para el caso 1, *Amitermes meridionalis*. En este caso se destaca que los mismos mecanismos pueden perseguir una función distinta, ya sea térmica o de ventilación. (Elaboración propia)

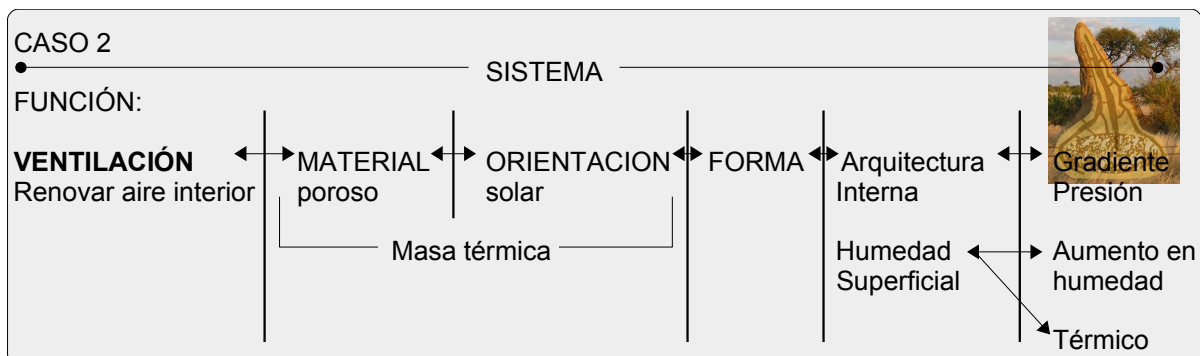


Figura 7.4: Diagrama sintético de estrategias para el caso 2, *Macrotermes michaelseni*. En este ejemplo presenta estrategias similares al caso 1, destaca que el uso de una sección en planta con forma circular, permite captar el viento en todas direcciones sin importar la orientación. También destaca el uso de la humedad superficial en la envolvente que promueve un enfriamiento evaporativo directo. (Elaboración propia)

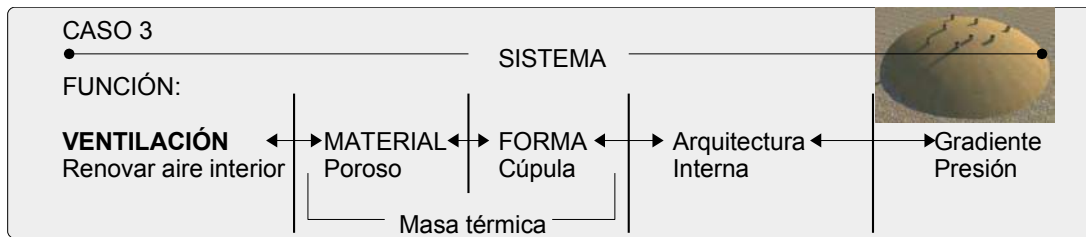


Figura 7.5: Diagrama sintético de estrategias para el caso 3, *Atta laevigata* y *vollenweideri*. Destaca la similitud de estrategias entre este y los dos casos anteriores. Ya sea con un fin térmico o de ventilación el uso de un material poroso, la forma, y la masa térmica son constantes en los tres diagramas. (Elaboración propia)

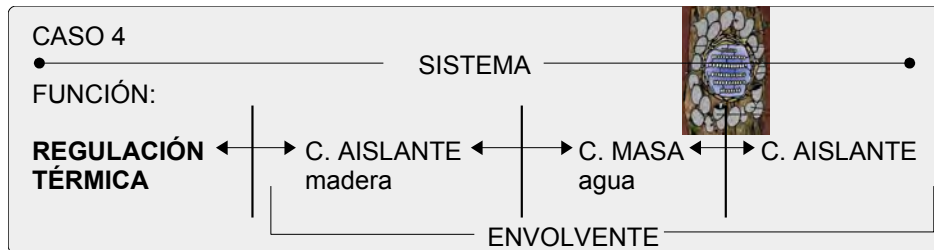


Figura 7.6: Diagrama sintético de estrategias para el caso 4, *Apis mellifera* y *meliponini*. (Elaboración propia)

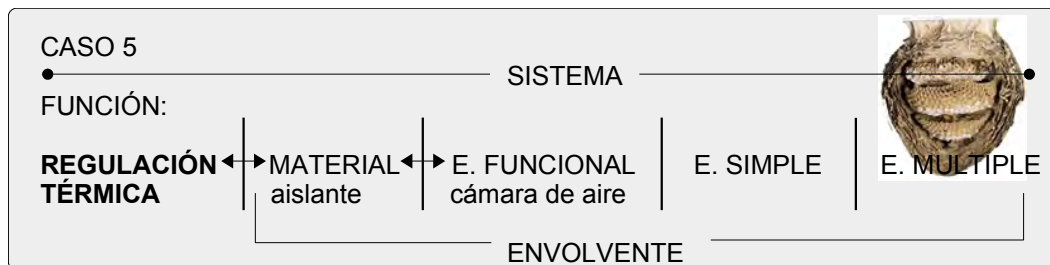


Figura 7.7: Diagrama sintético de estrategias para el caso 5, *Polistinae* y *Vespinae*. En este caso y el anterior destaca no solo las propiedades térmicas de los distintos materiales sino la ubicación de las mismas que componen la envoltorio. (Elaboración propia)

Se observa en los diagramas de funciones notorias coincidencias, en particular para los tres primeros casos. La ventilación del espacio interior está relacionada con la superficie porosa de la envoltorio debido al material y el método con la que se construye. Mismo material que posee propiedades de retardo térmico (tierra), si se combina con la orientación solar adecuada. Este mecanismo también destaca en el análisis de la matriz de estrategias de control climático de Watson y Labs (1983).

La forma en los tres casos promueve la ventilación, ya sea exponiendo la mayor superficie posible al eje eólico, generando diferencias de presión, horizontales o verticales, como se logra con las geometrías curvas. Por último la arquitectura interna (ductos) permite conducir el viento a ambos extremos de la estructura y por tanto aprovechar los gradientes de presión y temperatura.

Por último se observa en el caso número dos que la humedad superficial en combinación con las características antes mencionadas, en particular las propiedades porosas de la envoltorio promueven un enfriamiento evaporativo directo útil de aplicar a una envoltorio arquitectónica.

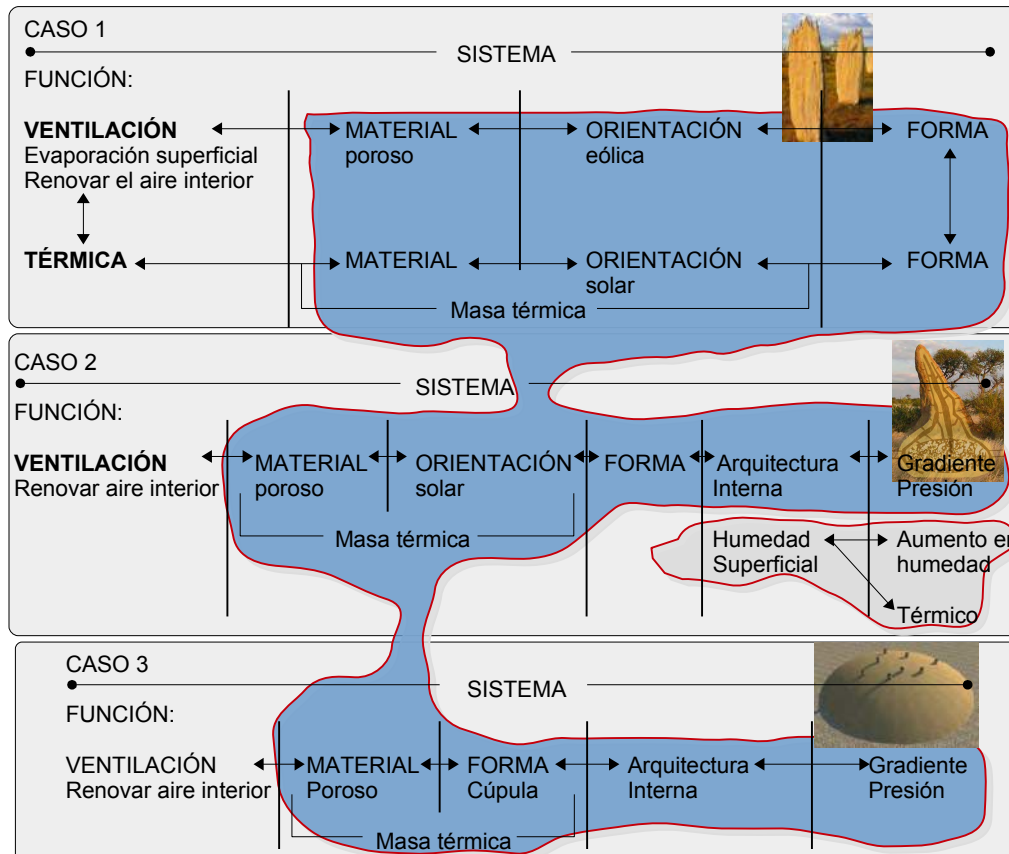


Figura 7.8: Síntesis de mecanismos seleccionados para aplicar a una envolvente arquitectónica con base en 3 casos de estudio. (Elaboración propia)

Se concluye que las principales estrategias a considerar para el diseño de una aplicación son, una envolvente porosa con propiedades de inercia térmica, ventilación y enfriamiento evaporativo directo.

7.3.- Análisis climático.

La modelización de estrategias también permite observar si los mecanismos determinados están relacionados a la condición climática. O si los casos de estudio se sitúan en climas distintos y los rangos de confort no pueden equipararse, aún así es posible determinar el clima adecuado donde aplicar los mecanismo considerados.

Las recomendaciones de estrategias pasivas expuestas por varios autores apuntan a que los mecanismos seleccionados anteriormente son aplicables a climas cálido – secos. Según la agrupación bioclimática de ciudades (Fuentes y Figueroa, 1990) las localidades con temperatura media del mes más caluroso mayor a 26°C y una precipitación pluvial total anual menor a los 650 mm se consideran en esta clasificación.

A continuación se muestra un breve análisis climático de Mexicali, Baja California. Temperatura media 34.8°C (julio), Precipitación total anual: 73.3mm.

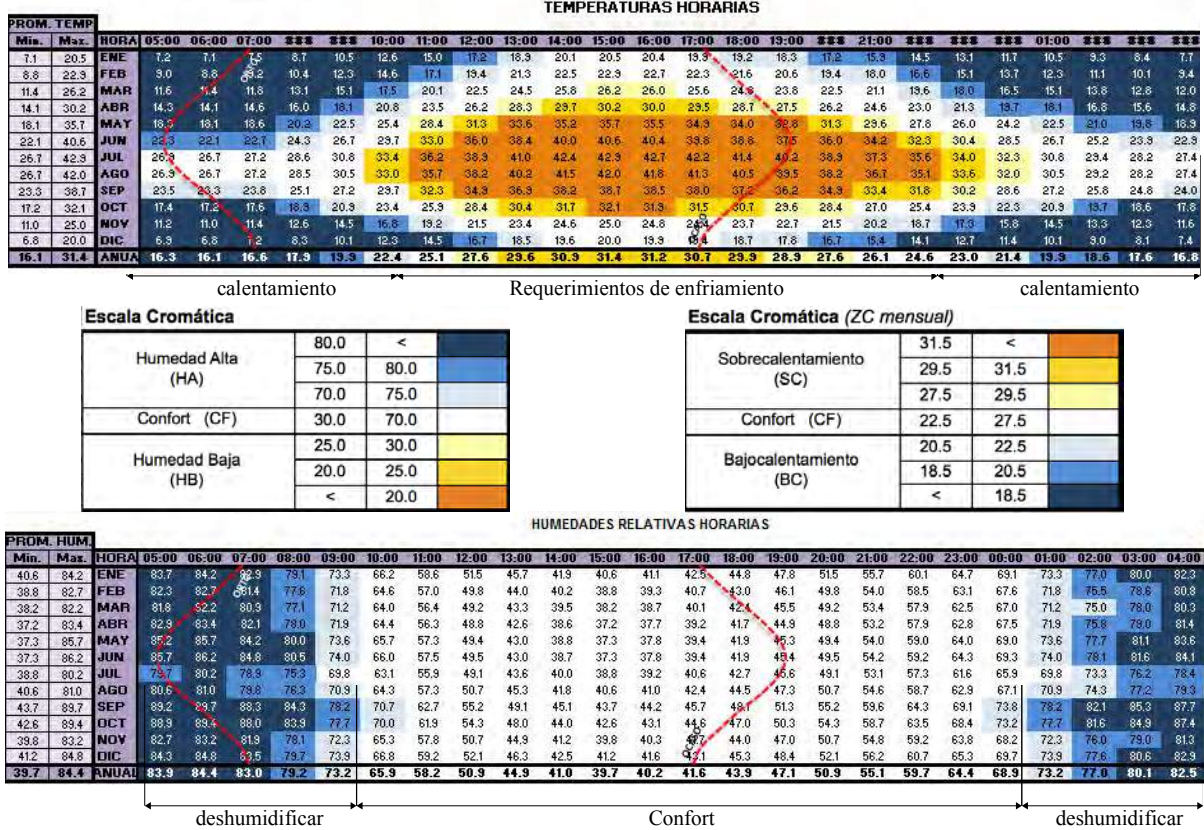


Figura 7.9: Temperaturas y humedades horarias, elaboración con base en datos de SMNA 1981-2010. Análisis generado en la herramienta BAT (Rincón Martínez y Fuentes Freixanet, 2013). Se observa que cuando la temperatura rebasa los 35°C es necesario enfriarla antes de ventilar, aquí el enfriamiento evaporativo es adecuado.

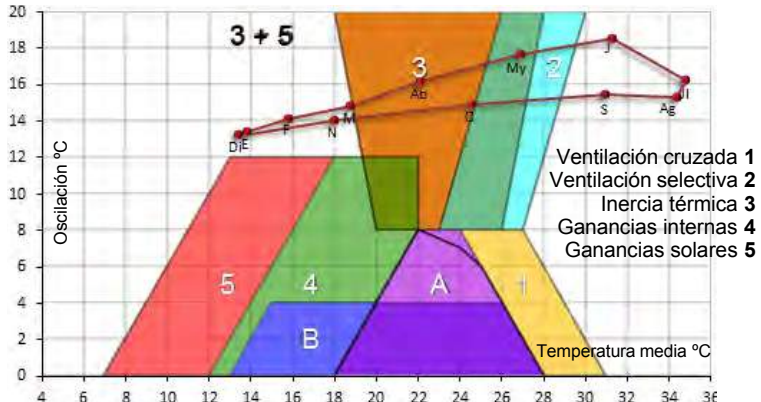


Figura 7.10: Estrategias bioclimáticas recomendadas según los triángulos de confort de Evans. Análisis generado en la herramienta BAT (Rincón Martínez y Fuentes Freixanet, 2013). Se observa que para un clima como Mexicali, con alta oscilación térmica debido a la falta de humedad, se recomienda el uso de la inercia térmica para amortiguar la temperatura. La ventilación selectiva dependiendo de la temperatura del aire y las ganancias solares para aumentar la temperatura por las mañanas y madrugadas.

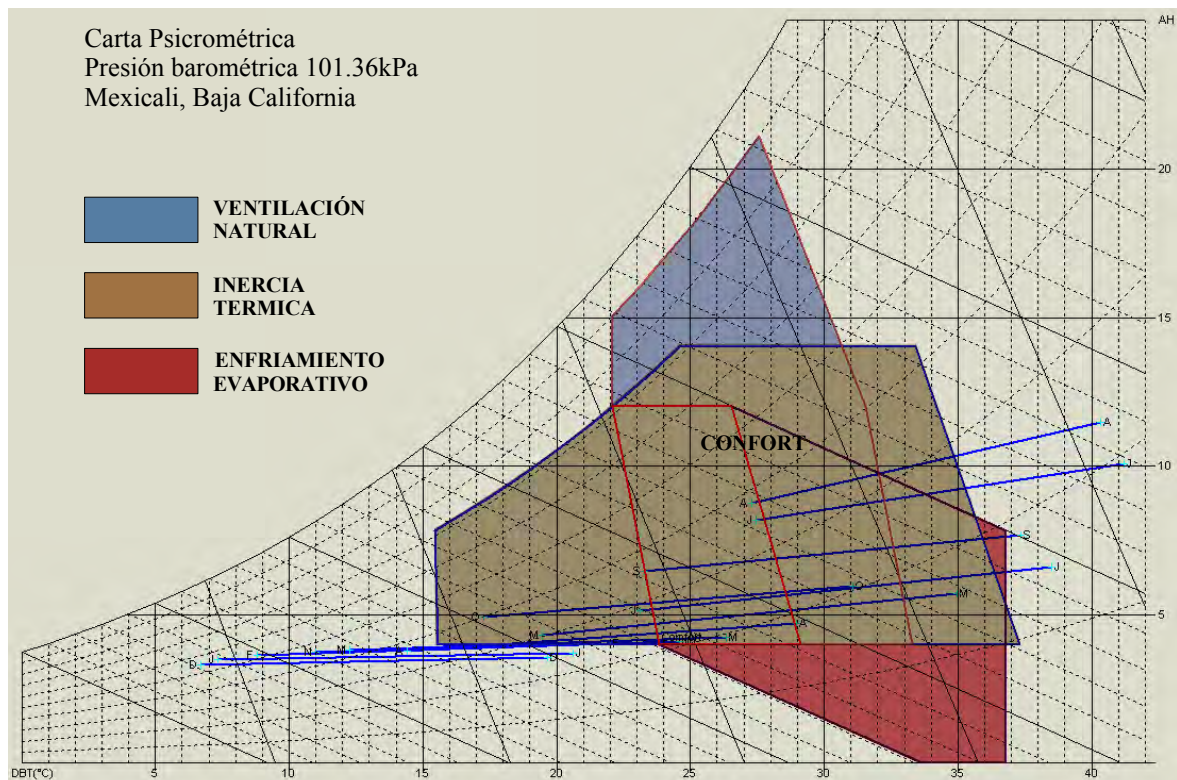


Figura 7.11: Estrategias de diseño pasivo basadas en la carta psicrométrica para interiores de Givoni. Mexicali, Baja California, generada en Ecotect Analysis 2011, con datos climáticos de Meteonom. Los 3 mecanismos definidos en los diagramas para modelizar estrategias permitirían aumentar las horas de confort para un clima cálido – seco.

Es posible determinar a partir del análisis climático que los mecanismos de inercia térmica, ventilación natural y enfriamiento evaporativo resultan de utilidad en climas cálido-secos. En particular para amortiguar la amplitud térmica típica de los climas secos, cómo se observa en las recomendaciones de los Triángulos de Evans. Por su parte la ventilación natural y el enfriamiento evaporativo directo permiten aumentar el número de horas de confort como se muestra en la carta psicrométrica de Givoni.

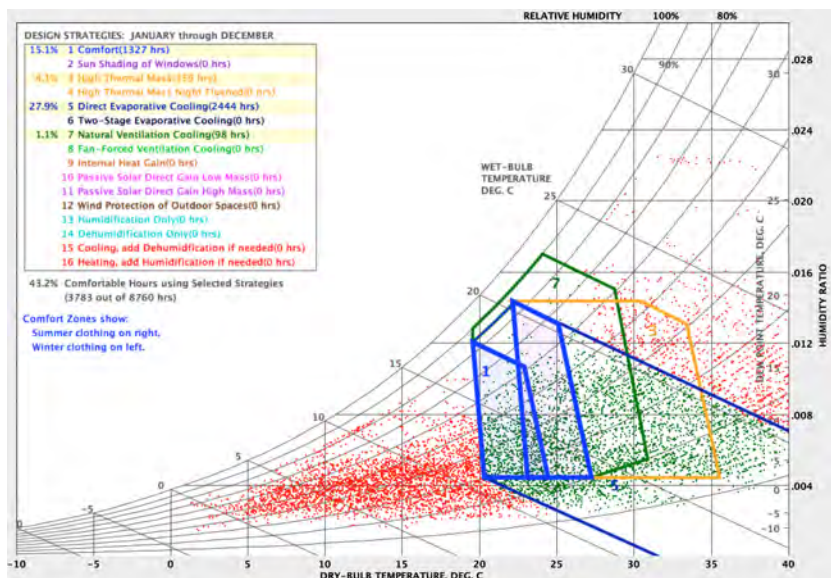


Figura 7.12: Carta psicrométrica generada en Climate Consultant 5.5 con datos climáticos de Meteonom y un modelo de confort según ASHRAE Handbook of fundamentals 2005. Indica un rango de oportunidad del 43.2% de horas de confort utilizando las estrategias definidas para un clima como el de Mexicali, Baja California.

8.- Diseño conceptual de una aplicación con base en los componentes bioclimáticos seleccionados de la muestra de estudio.

Una vez determinadas las estrategias de climatización a reinterpretar y ubicadas en una condición climática específica, es posible generar diseños que contengan los mecanismos y funciones descritas anteriormente. Es decir ya se ha generado un acervo de conocimientos al servicio del diseño.

Cómo se mencionó en la metodología, el inicial de diseño se confrontó con las estrategias y a la condición climática determinada y a partir de estas se acotó de la siguiente manera:

“Diseño de una envolvente porosa para climas cálido – secos con cualidades de inercia térmica, ventilación y enfriamiento evaporativo directo.”

8.1.- Muros gaviones como sistema de envolvente porosa.

La propiedad más destacada de las encontradas en los ejemplos de arquitectura animal es la referente a la porosidad de la envolvente, ya que promueve el resto de las estrategias seleccionadas. Debido a que estas especies utilizan la tierra como materia prima y al procedimiento constructivo, el resultado es que se tiene una envolvente con propiedades de inercia térmica y al mismo tiempo permite la ventilación ya que los numerosos conductos que quedan expuestos permiten la respiración de todo el edificio.

En estos conductos o poros queda atrapada una capa superficial de humedad ya sea proveniente de la lluvia o la saliva agregada por los constructores como aglutinante, al pasar el viento a través de los huecos la humedad se evapora enfriando el aire en el cambio de fase y agregando humedad al aire que ingresa al espacio interior.

En la arquitectura un ejemplo similar se encuentra en los materiales de uso vegetal como los que se utilizan en las casas Mayas con forma de ábside, que permiten el paso del viento al formar envolventes abiertas, útiles para climas cálido húmedos (Rodríguez Viqueira y Fuentes Freixanet, 2006). Para climas cálido secos la combinación deseable está en permitir la ventilación pero manteniendo el efecto de masa térmica que estabiliza la amplitud térmica.

Los gaviones son contenedores a partir de enrejados metálicos que se rellenan con rocas y piedras para formar estructuras de gran capacidad estructural. Se han utilizado constantemente como sistemas de presas o para contener tierras expuestas a la erosión de ríos ya que debido a su porosidad permiten el paso del agua.

Su uso en la arquitectura civil o militar es muy antiguo, según el Diccionario de la Real Academia Española la palabra gavión proviene del francés *gavia* y este del latín *cavēa*, que significa entre otras cosas jaula. Según la RAE, los gaviones son “cilindros de grandes dimensiones, tejido de mimbres o ramas, lleno de tierra, que sirve para defender de los tiros del enemigo a los que abren la trinchera”. Actualmente también se utilizan en proyectos arquitectónicos principalmente por las cualidades estéticas de la piedra. Sin embargo no se han investigado sus cualidades cómo sistema de climatización pasiva, debido a sus cualidades porosas.



Figura 8.1: Arriba, superficie porosa reportada en los nidos de *Macrotermes Michaelseni* (Turner y Soar, 2008). Abajo, muro a partir de gaviones. Fuente: inhabitat.com



Figura 8.2: Muro de contención a partir de gaviones de piedra, Fuente: <http://milkwood.net/>

“Los gaviones son llenados más o menos densos según se requiera, así algunas partes de los muros son impenetrables a la luz mientras que otros permiten el paso de la misma. Se puede describir el uso de hacemos de los gaviones como una especie de cestería de piedra con distintos grados de transparencia, más como una piel que como una mampostería tradicional.” (www.herzogdemeuron.com, 2014).



Figura 8.3: Dominus Winery, Herzog y de Meuron, Napa California. Fuente: <http://www.swissmade-architecture.com/> fotografía de John Lambert Pearson.

8.2.- Posibilidades, modificaciones y adecuaciones a muros gaviones para alcanzar los mecanismos seleccionados.

A continuación se muestra una síntesis de las posibilidades para alcanzar las estrategias seleccionadas, a través del diseño. Uso de una envolvente porosa, con cualidades de inercia térmica, ventilación y enfriamiento evaporativo directo (EED).

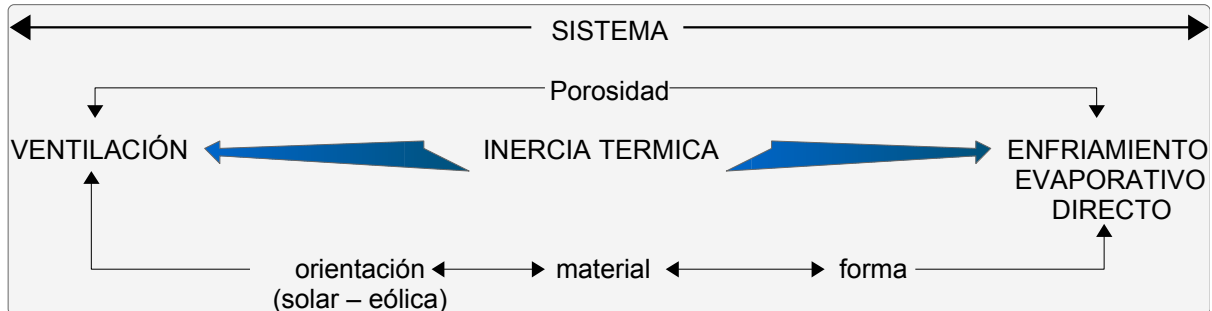


Figura 8.4: Diagrama de diseño conceptual de las estrategias seleccionadas. (Elaboración propia)

La característica porosa de la envolvente es aquella que permitiría regular el resto de los mecanismos. Sería esperable que a mayor porosidad se redujera el efecto de masa térmica del material, sencillamente porque habría menor masa a calentar. Por otro lado a mayor porosidad podría promover la ventilación al aumentar el área de aberturas, de igual forma a mayor porosidad podría aumentar el EED.

Sin embargo la masa térmica podría disminuir también debido a un mayor enfriamiento convectivo promovido por una mayor tasa de ventilación o por un enfriamiento conductivo al interactuar con una masa de aire húmeda.

I. POROSIDAD.

La porosidad de la envolvente puede modificarse mediante el tamaño del agregado. El rango de porosidad está reportado entre el 25% y el 40% del volumen total del muro (Camargo y Franco, 2001), si se modifica este valor podría aumentarse o disminuirse la tasa de ventilación que permite el sistema.

	Relleno	
	diámetro cms	porosidad "n"
Piedra	10-20	0.25
	15-25	0.30
	20-30	0.35
		0.40

Tabla 8.1: Relación de porosidad y tamaño del agregado. Fuente: Camargo y Franco, 2001.



Figura 8.5: Muro gavión con distintas porosidades a partir del tamaño del agregado. Fuente: www.pinterest.com

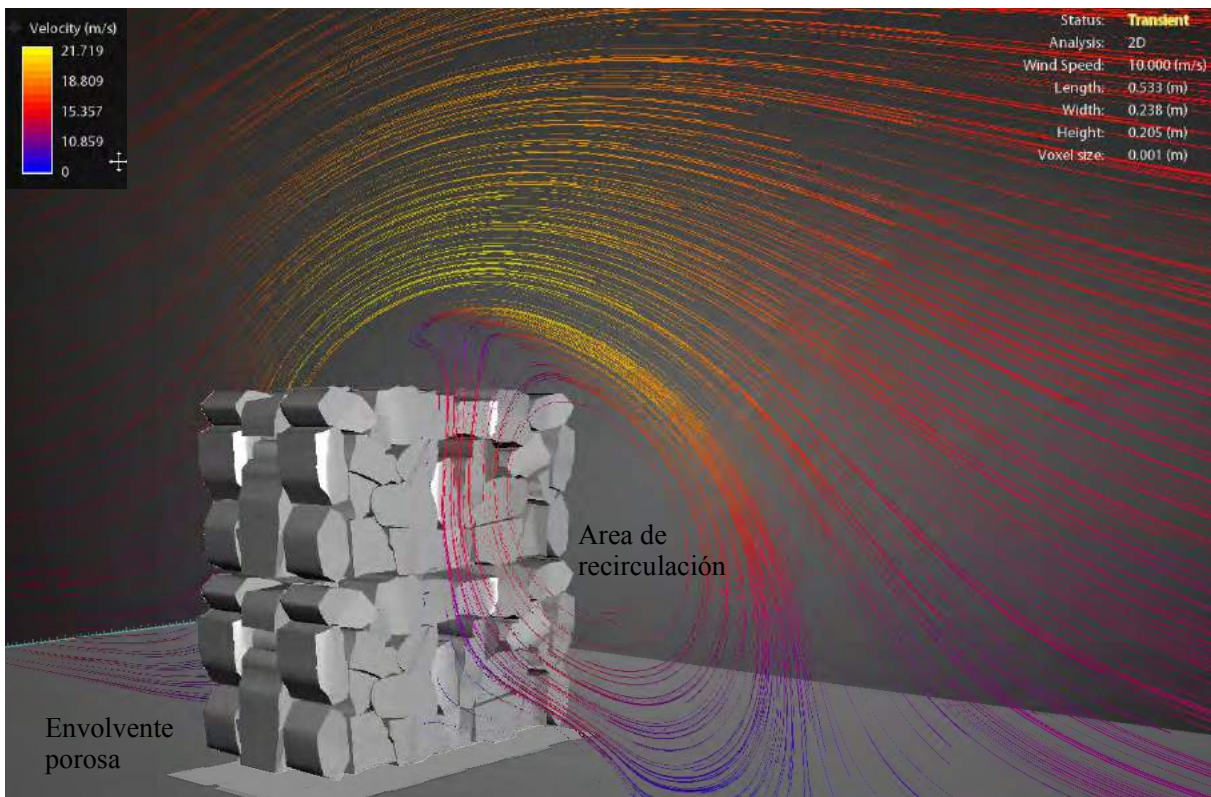


Figura 8.6: Visualización de una envolvente porosa confrontada al paso del viento. Análisis generado en Autodesk Flow Design con un modelo tridimensional de 0.60 X 0.60 X 0.30 m y 25% de porosidad. (Elaboración propia)

II. POROSIDAD, VENTILACION Y EED.

Si se requiere de aumentar la ventilación que pasa a través del sistema en un punto específico, por ejemplo a la altura de los ocupantes, pueden colocarse ductos o tuberías al interior del contenedor, cómo el caso de postes de bambú.



Figura 8.7: Dispositivos para aumentar la tasa de ventilación de la envolvente. Fuente: Izquierda, <http://www.archdaily.mx>, Casa Soe Ker Tie, Tyin Tegnestue Arquitectos, fotografía de Pasi Alto. Derecha, <http://dekorminimalis.blogspot.mx>.

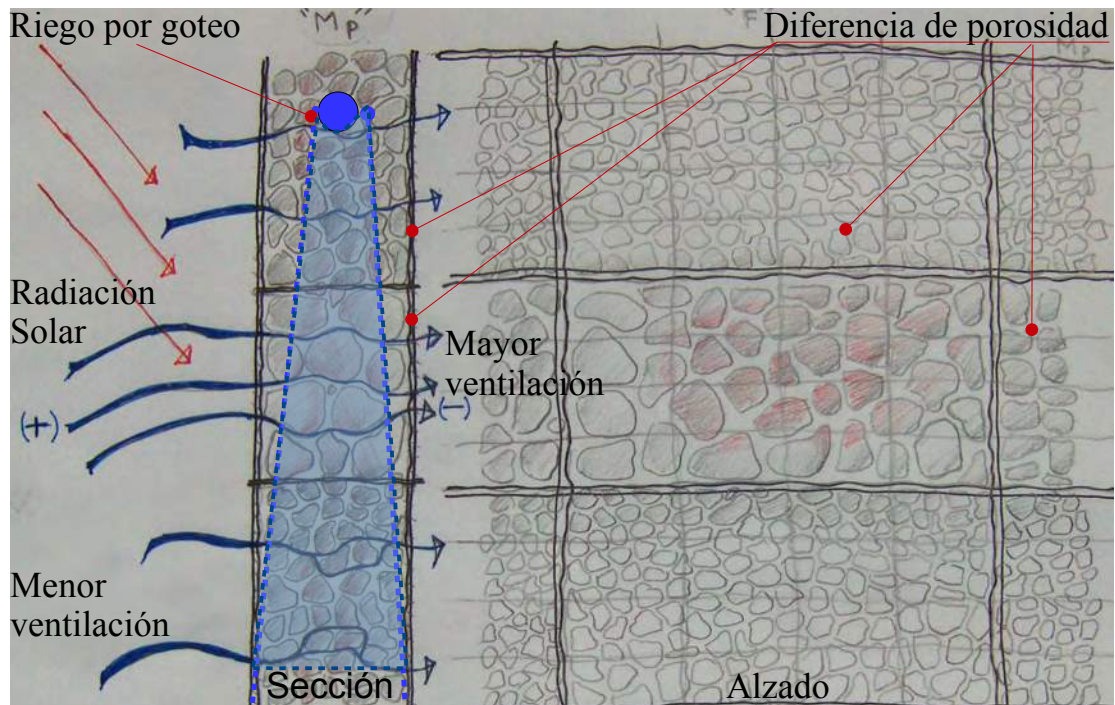


Figura 8.8: Sección y alzado de la envolvente propuesta. Se muestra una variación en la porosidad ya sea modificando el tamaño del agregado o con ductos transversales. El sistema de enfriamiento evaporativo directo está representado mediante un riego por goteo interno a la envolvente. La orientación de la envolvente también es un punto a considerar, ya sea al eje térmico o al eje de ventilación. (Elaboración propia)

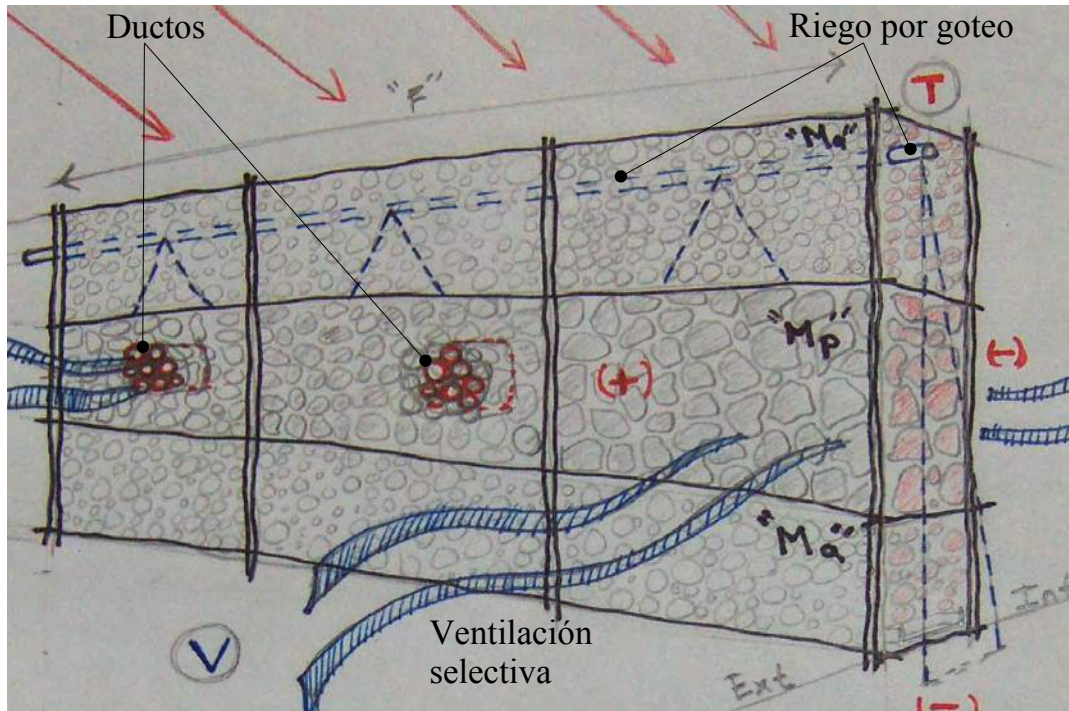


Figura 8.9: Perspectiva de una envolvente porosa con ventilación selectiva a través de una variación en la porosidad y posibilidades de enfriamiento evaporativo directo mediante un riego por goteo interno. Así como en el caso de los nidos de *Macrotermes Michaelsenii*, el paso del aire a través de un medio poroso humedecido producirá un enfriamiento del mismo y un aumento en la humedad del aire interior. (Elaboración propia)

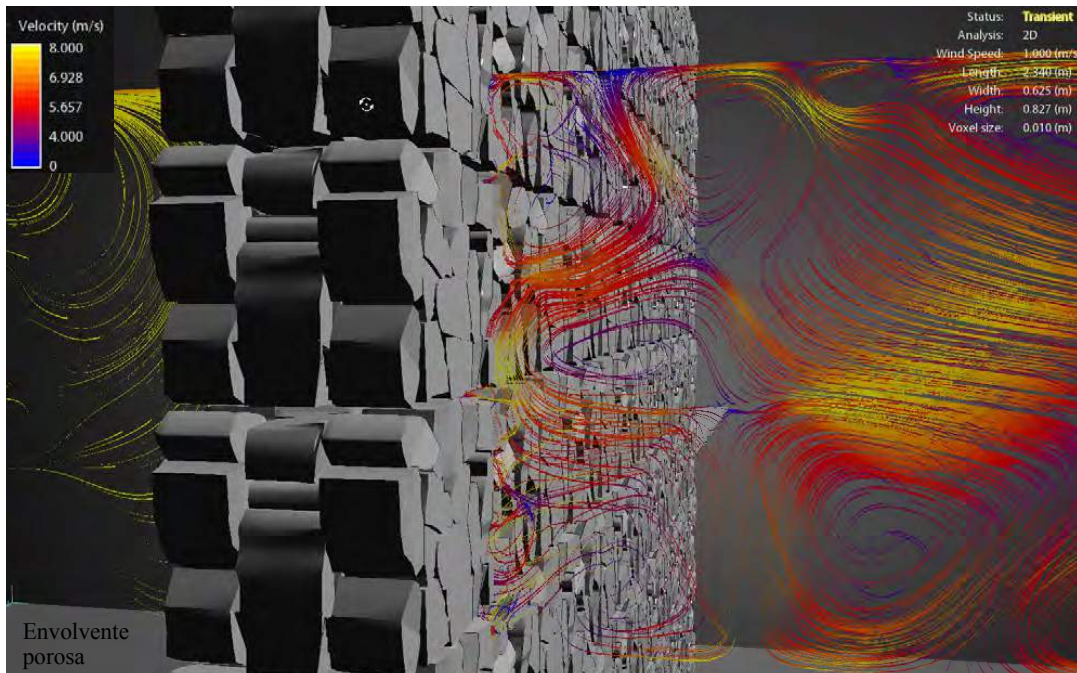


Figura 8.10: Visualización de una envolvente porosa confrontada al paso del viento. Se observa que este tipo de envolvente puede comportarse como una barrera semi abierta y por lo tanto modificar el área de recirculación. También puede apreciarse que el viento se acelera al atravesar el sistema y podría por tanto producir un mayor enfriamiento convectivo del sistema constructivo. (Elaboración propia)

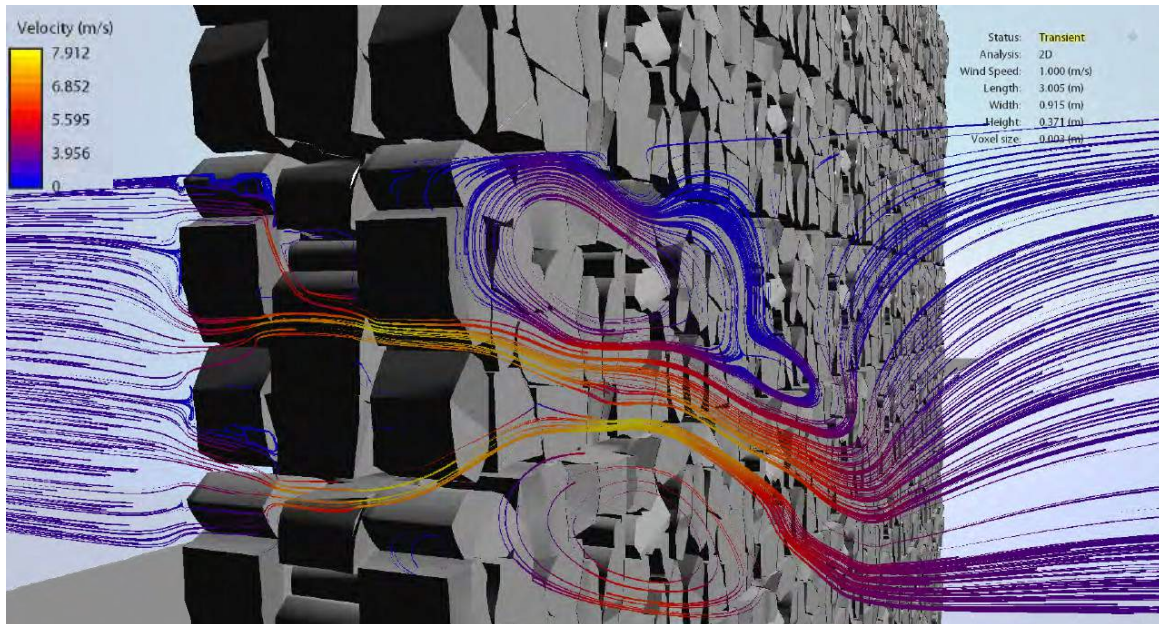


Figura 8.11: Visualización del paso del viento a través de una envolvente porosa. Puede observarse como el viento pierde velocidad al llegar a la envolvente y al paso entre las piedras se acelera debido al efecto Venturi. (Elaboración propia)

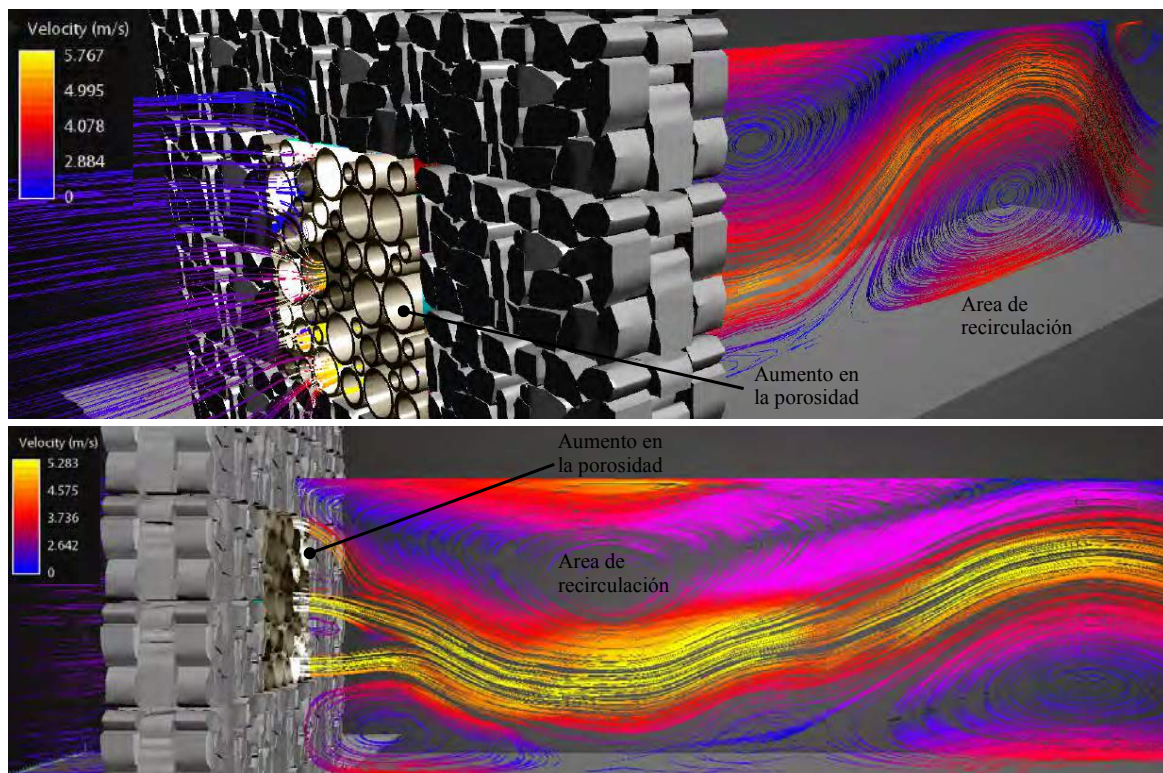


Figura 8.12: Aumento en la porosidad mediante ductos dentro del sistema constructivo, puede observarse como el área de recirculación se ve modificada por el paso del viento. Análisis realizado en Autodesk Flow Design con un modelo tridimensional de 25% de porosidad a una velocidad de 1 m/s. (Elaboración propia)

III. INERCIA TÉRMICA.

La inercia térmica o tiempo de retraso de una envolvente está dado por la diferencia del tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura sol-aire y el tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura interior de un espacio, en general se considera que los materiales deben presentar el mayor tiempo de retraso (Huelsz et al, 2012).

En el caso de la envolvente propuesta la piedra posee altos valores de tiempo de retraso debido a la combinación de sus características termofísicas. Sin embargo la cualidad porosa del sistema aumenta de forma importante el área de contacto interna que interactúa con la temperatura del aire exterior y la velocidad con la que este a traviesa, por lo que la hipótesis de que a mayor porosidad – ventilación se puede esperar menor retardo térmico debido a que se expone a un mayor enfriamiento convectivo, es uno de los factores a evaluar.

Material	Calor específico (J/Kg grado °C)	Densidad Kg/m ³	Conductividad (W/m °C)	Difusividad (m ² /h)	Retardo (horas)
Piedras					
Arenisca	730.00	2,000.00	1.29	0.00000088	7.35
Caliza	910.00	2,500.00	1.53	0.00000067	8.42
Granito	1,030.00	2,700.00	1.92	0.00000069	8.32

Tabla 8.2: Tiempo de retraso y algunas características termofísicas para tres distintos tipos de piedras. Fuente: Tudela, Fernando (1982).

La piedra es un recurso abundante en el planeta y por lo tanto puede considerarse como un material local, sin embargo además de piedras el gavión puede funcionar utilizando otros materiales que mantengan la porosidad y que tengan cualidades de masa térmica y que tengan un segundo uso, es decir que provengan de la demolición de algún edificio.

Tiempos de inercia térmica			
Material	Espesor en Centímetros	Valor de (U) Cal/cm ² /min	Retraso en Horas
Piedra	20	0.0031	5.50
	35	0.0025	8.00
Concreto	15	0.0034	3.80
	20	0.0030	5.10
Ladrillo común	10	0.0028	2.30
	20	0.0019	5.50

Tabla 8.3: Posibles materiales a reutilizar provenientes de demolición como agregado en gaviones. Valores de coeficiente de transferencia de calor "U" y retraso térmico tomados de Olgay, 2010.

IV. ORIENTACIÓN Y FORMA.

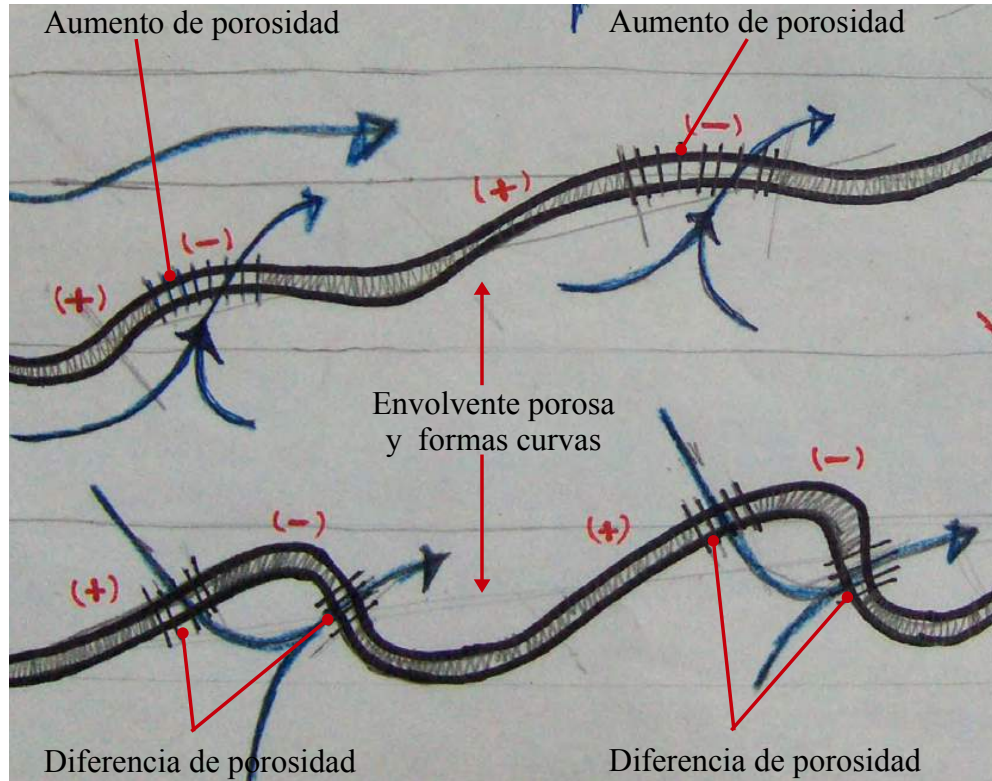


Figura 8.13: Envoltorio poroso vista en planta en conjunto con formas curvas. Si se orienta una envoltorio poroso al paso del viento, la modificación en la porosidad puede aprovecharse en la cresta de la forma curva donde se acelera el paso del viento o en los extremos opuestos aprovechando un gradiente de presión. Un efecto similar se ha estudiado para la ventilación unilateral para fachadas con muros salientes (*wing walls*) como los realizados por Givoni (1994). (Elaboración propia)

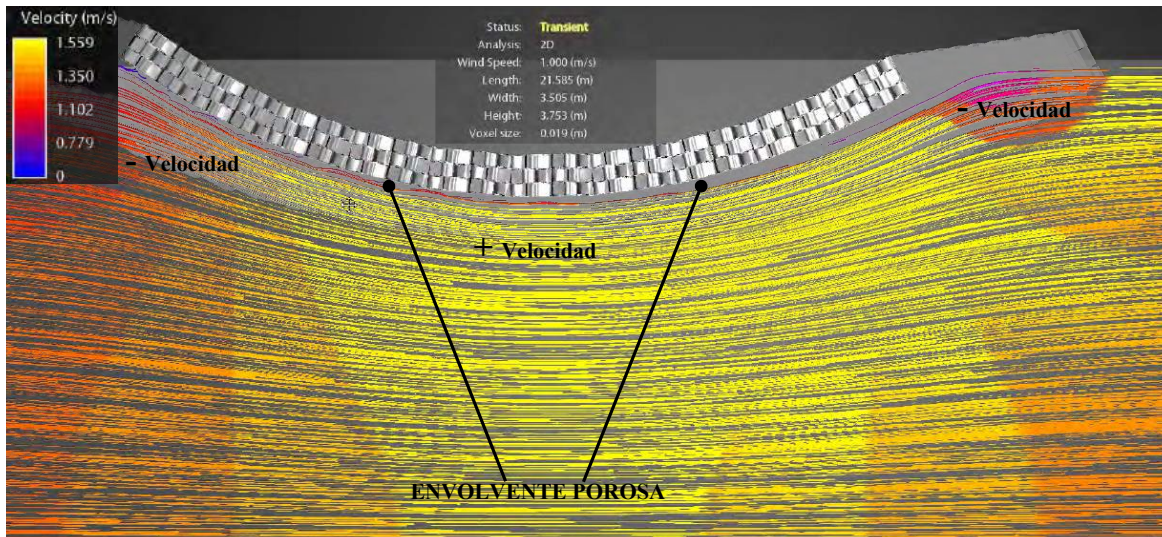


Figura 8.14: Envoltorio poroso vista en planta en conjunto con formas curvas. Así como en los ejemplos de construcciones animales, la función climática se expresa mediante ciertas formas que promueven dichos mecanismos, en este caso una envoltorio curva permite generar gradientes de presión y por tanto acelerar el paso del viento. En conjunto con una superficie porosa permite la ventilación. Análisis realizado en Autodesk Flow Design con un modelo tridimensional de 25% de porosidad a una velocidad de 1 m/s. (Elaboración propia)

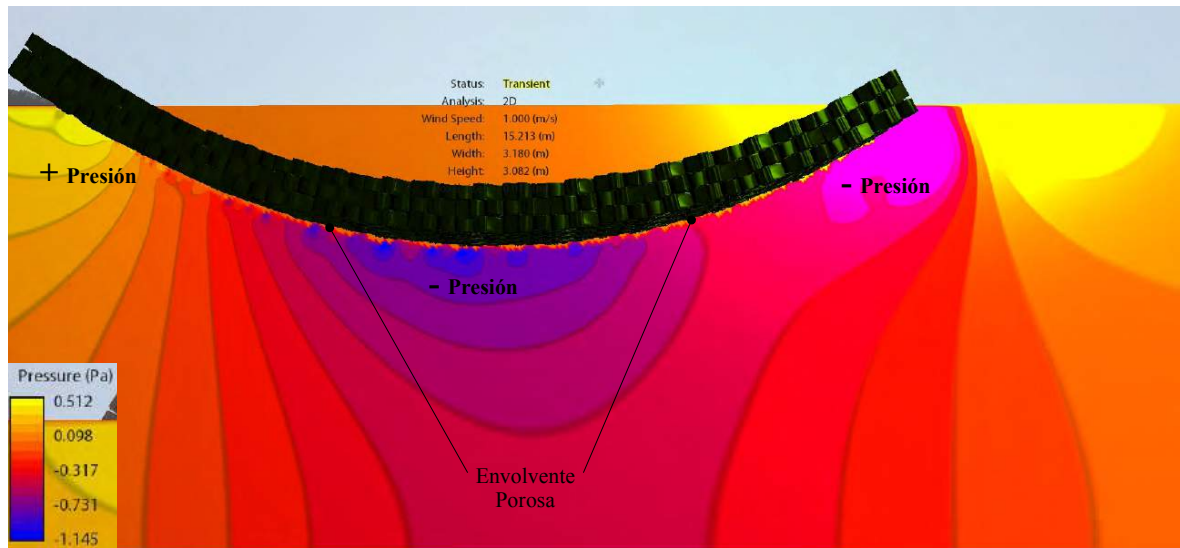


Figura 8.15: Vista en planta de una envolvente porosa y curva, se observa el gradiente de presión. Análisis realizado en Autodesk Flow Design con un modelo tridimensional de 25% de porosidad a una velocidad de 1 m/s. (Elaboración propia)

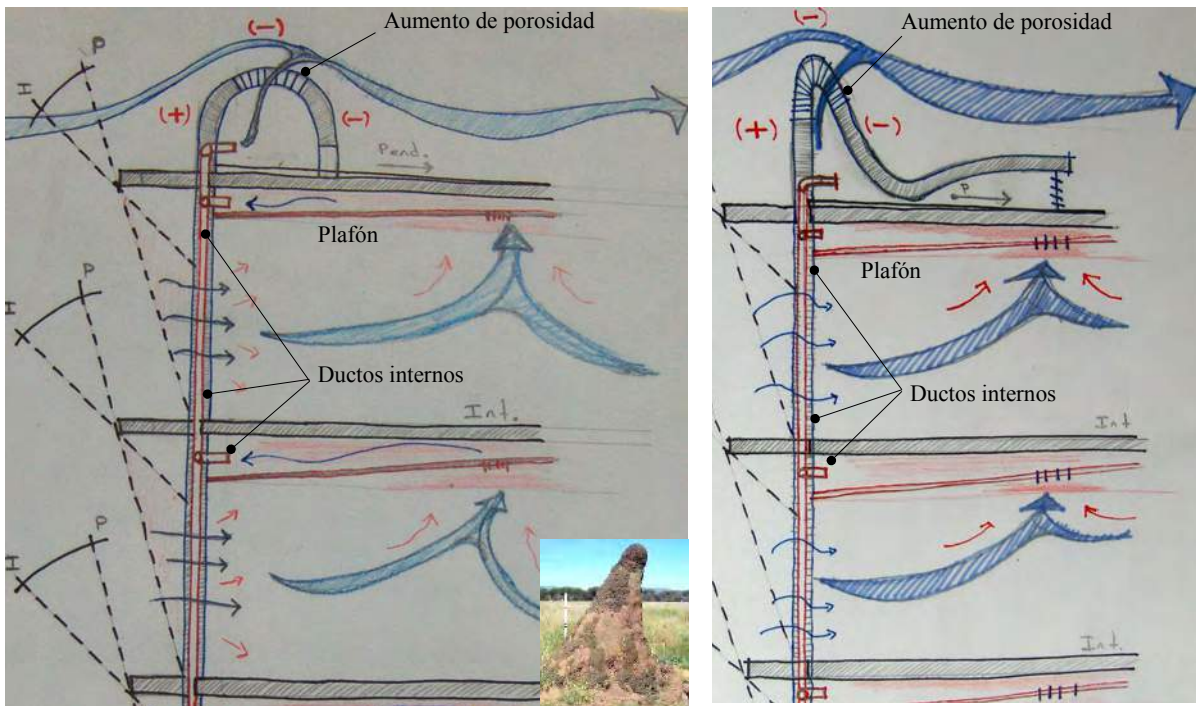


Figura 8.16: Cortes esquemáticos de una envolvente porosa que aprovecha un gradiente de presión vertical en conjunto con ductos que interconectan espacios internos. Una variación en la porosidad del sistema en la parte más alta produce un efecto de succión, mientras que la estratificación térmica del aire permite mejorar el movimiento ascendente del aire caliente. (Elaboración propia)

V. CONCLUSIONES PRELIMINARES.

Como se expone en el presente capítulo, es posible aplicar las estrategias de climatización pasiva determinadas para algunas de las construcciones de las especies animales y utilizarlas como parte del acervo de información del diseño arquitectónico, en específico en el diseño bioclimático.

A partir de los mecanismos seleccionados de la muestra de estudio y de la ubicación de una condición climática al cual aplicarlos, se propone utilizar un sistema constructivo existente como son los gaviones de piedra y darle particular énfasis a sus cualidades porosas para alcanzar las estrategias de inercia térmica, ventilación y EED, para aplicarse a envolventes arquitectónicas.

Se muestran modificaciones a la envolvente para promover la ventilación, a partir del tamaño del agregado o a la ubicación de ductos en puntos específicos. Otras como la incorporación de un riego por goteo al interior de la envolvente para promover el EED.

La masa térmica del sistema esta representada por el material base del sistema constructivo, las piedras como se muestra en las tablas descritas poseen cualidades destacadas de retardo térmico, sin embargo también se menciona que es posible que a mayor ventilación o EED la envolvente podría perder capacidad de almacenamiento térmico.

Por último se muestra la envolvente propuesta en combinación con formas curvas y como podría aprovecharse la cualidad porosa del sistema con este tipo de geometrías.

Las modificaciones y adecuaciones de un sistema constructivo existente a través del diseño, permiten la interacción de los mecanismos determinados. Sin embargo esta interacción se muestra a nivel conceptual por lo que para poder considerar el diseño de una aplicación a nivel ejecutivo es indispensable la evaluación de los mecanismos expuestos.



Figura 8.17: Modelo tridimensional de una envolvente curva con distintos porcentajes de porosidad. (Elaboración propia)

9.- Evaluación del desempeño bioclimático de la aplicación.

9.1.- Diseño de evaluación.

El diseño de evaluación está encaminado a determinar que la envolvente propuesta cumple con los requerimientos para los que está enfocada, es decir que funciona para lo que se espera que funcione. Y a partir de ahí poder realizar diseños ejecutivos de la aplicación u otras evaluaciones complementarias para llegar a esta meta, dependiendo del grado de complejidad del problema.

Llegado a este punto de la metodología se puede decir que se ha generado un acervo de conocimientos basados en los sistemas de climatización de algunas construcciones animales, se ha extraído una parte del conocimiento contenido en estos sistemas, representado por las estrategias bioclimáticas de estas arquitecturas y se ha demostrado que es posible aplicarlos a una envolvente arquitectónica.

A partir de este punto los conceptos que se utilizarán, serán las estrategias bioclimáticas que se han determinado durante la investigación, es por eso que el diseño de evaluación está basado en demostrar que es posible alcanzar los mecanismos de inercia térmica, ventilación y EED con el diseño conceptual propuesto y no es relevante incluir a las construcciones animales en la evaluación ya que esta información se genera por parte de los investigadores de las ciencias naturales.

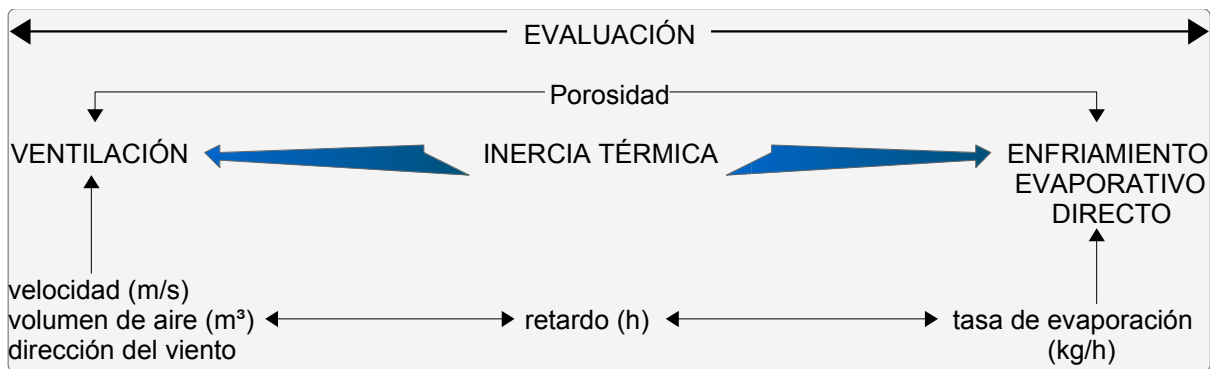


Figura 9.1: Diagrama de evaluación de la envolvente propuesta, donde puede observarse los puntos principales a evaluar. El porcentaje de porosidad de la envolvente, la ventilación y el EED. Y su relación con la inercia térmica del sistema. (Elaboración propia)

El objetivo de la evaluación es demostrar que una envolvente porosa a partir de gaviones es capaz de cumplir con los mecanismos determinados. Como se mencionó en el diseño conceptual, la característica más sobresaliente es la porosidad ya que esta favorece o desfavorece el resto de los mecanismos, así se decidió determinar el porcentaje de porosidad de una muestra de gaviones como parte inicial de la evaluación.

Segundo se mencionó que la inercia térmica propia del material base se vería modificada, tanto por el porcentaje de porosidad como por el enfriamiento convectivo del aire que pasa a través del sistema, cómo por el enfriamiento conductivo al entrar en contacto con el agua del riego interno. Por lo que una vez determinada que tan porosas son las muestras de estudio, el análisis deberá incluir una evaluación térmica en cuanto al tiempo de retardo, análisis de ventilación y de sus propiedades para generar enfriamiento evaporativo. Por último determinar cómo es que estos tres mecanismos interactúan entre si.

Sin embargo como se mencionó en la metodología, por motivos de tiempo se decidió dejar pendiente la parte de evaluación del EED. Y enfocarse en determinar el resto de las propiedades mencionadas, de la siguiente manera.

- I. Análisis de porosidad – porcentaje y densidad del sistema.
- II. Análisis de ventilación – velocidad, volumen de aire y dirección del flujo.
- III. Análisis térmico – conductancia y retardo térmico.

Para realizar los estudios experimentales mencionados se construyeron dos gaviones metálicos y se obtuvo la piedra para rellenarlos según las siguientes especificaciones.

Gavión metálico			
	Largo	Altura	Espesor
Medidas (mts)	0.600	0.600	0.300
Rejilla (mts)	0.050	0.050	0.003
Material	Acero galvanizado		
Nombre comercial	Malla 5 X 1/8"		

Tabla 9.1: Especificaciones de gaviones para muestra de estudio.

Material de relleno	
Material	Piedra
Nombre comercial	Braza
Tipo	Basalto, ígnea volcánica
Tamaño	10, 15 y 20 cms aprox.
Cantidad	10 bultos
Volumen (m ³)	0.380
Conductividad (W/m grado °K)	2.500

Tabla 9.2: Especificaciones de material de relleno a partir de piedra para muestra de estudio. El tamaño de las piedras se determinó al inscribir la muestra en un círculo de diámetro de 10, 15 ó 20 cm. Sin embargo esta dimensión puede variar en cuanto a la profundidad y producir piedras tipo laja, es decir planas. Conductividad térmica según NOM-008-ENER-2001.

Las recomendaciones para la construcción de gaviones de piedra varían según la función para la que esta destinados, principalmente son de carácter estructural ya que este ha sido usualmente su función. En general se utiliza la malla galvanizada de triple torsión debido a su buen desempeño estructural y a la protección contra la oxidación. Dado que este tipo de malla es flexible se recomienda utilizar tirantes interiores de alambre para que ligen las caras opuestas de la caja y así obtener formas rectangulares bien definidas (López Martínez y Oropeza Mota, 2009).

Otras recomendaciones como las mencionadas en la norma D6711-01 de ASTM, en cuanto a las rocas que deben ser duras, resistentes al agua o a la humedad durante toda la vida de la estructura y en general el tamaño de estas debe estar relacionado al tamaño de la malla que las contiene para evitar que se desplacen fuera del contenedor (ASTM International, 2008).

En este caso el criterio para la construcción de los gaviones fue utilizar rejilla rígida en lugar de la tradicional malla de gallinero, dado que esta se deforma con facilidad y presenta cualidades menos estéticas para una envolvente de tipo arquitectónico. Segundo con las dimensiones de 0.60X0.60X0.30cm se busca por un lado una superficie suficientemente amplia para analizar y un espesor de un muro de 30 cm, que puede otorgar un buen retardo térmico y al mismo tiempo ser una muestra de peso relativamente manejable en condiciones de laboratorio.

En cuanto al agregado de relleno se busco un tipo de piedra que se reportara en bibliografía con una conductividad media, como lo indica la NOM-008-ENER-2001 para el basalto, esperando obtener buenos tiempos de retardo térmico. Y que al mismo tiempo fuera una piedra de uso común en la construcción. Usualmente entre los proveedores de materiales para la construcción se ofrece a la venta piedra de tipo “braza” que es un nombre genérico para muchos tipos de rocas, en general todas de tipo volcánico, debido a que son los más comunes en México debido a los ejes volcánicos que atraviesan el país, entre los que se encuentra el basalto.



Figura 9.2: Gaviones de piedra de 0.60 X 0.60 X 0.30 m, como muestra de estudio de una envolvente porosa. Rejilla rígida a partir de malla galvanizada de 5 cm de abertura y 3 mm de espesor. Rellena de roca tipo basalto de tamaños aproximados 10, 15 y 20 cm. (Elaboración propia)

9.2 Análisis de porosidad, densidad y absorción.

I. Análisis de porosidad.

Existen varios materiales que pueden clasificarse como porosos, estos pueden ser de origen natural como tierra, arena, piedra, o una masa de vegetación. Otros de origen artificial como una placa de acero multiperforada, una celosía de tabique, cerámica. Algunos contienen pequeñas cavidades de aire atrapado, que tienen propiedades aislantes como el EPS, estos usualmente son muy ligeros y tienen poca masa. Otros son de tipo granular como la arena o la piedra, que poseen gran cantidad de masa.

Según menciona Luther Terblanche (2006) para que un material pueda ser considerado poroso debe cumplir con alguna de las siguientes cualidades.

- Debe contener poros o huecos libres de material sólido y estos deben estar embebidos dentro del sólido. Estos huecos usualmente contienen algún fluido (aire, agua, etc)
- Los fluidos deben ser capaces de acceder por una cara del material y emerger por la cara opuesta, es decir que es un medio permeable a los fluidos.

La porosidad ϵ se define, como el cociente entre el volumen de los poros y el volumen total de una muestra representativa del material. Una porosidad de cero indica un material completamente sólido, mientras que una porosidad de uno implica un espacio abierto (Terblanche, 2006). También puede expresarse en porcentaje del volumen total.

$$\epsilon = \frac{V_f}{V_o}$$

Ecuación 1: Para determinar el coeficiente de porosidad. Fuente Terblanche, 2006.

Donde: ϵ = Coeficiente de Porosidad
 V_f = Volumen de los poros
 V_o = Volumen total del material

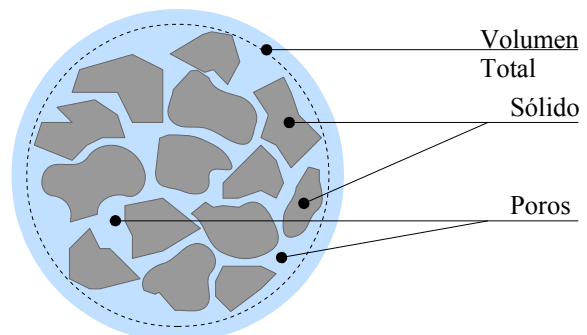


Figura 9.3: Figura esquemática de un material poroso. (Elaboración propia)

Para determinar el coeficiente de porosidad de la muestra de estudio, se realizó una prueba experimental utilizando el método de desplazamiento de fluidos. Consiste en desplazar el aire que ocupa los vacíos dentro del gavión y sustituirlo por agua para poder estimar el volumen de los poros.

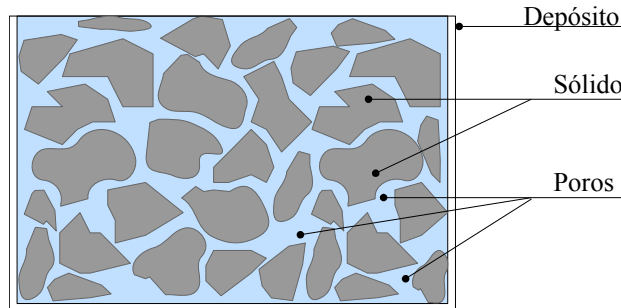


Figura 9.4: Figura esquemática de la relación entre el volumen del vacío y el volumen total de la muestra. (Elaboración propia)

Metodología.

- Determinar el volumen del depósito a utilizar.
- Determinar el peso del depósito.
- Determinar el tamaño del agregado a utilizar.
- Determinar el número de piedras por muestra y peso.
- Obtener el volumen del vacío (agua o aire).
- Obtener el volumen del sólido, (piedras).
- Estimar la porosidad de la muestra.

Material y equipo empleado.

- Deposito de 83 litros.
- Probeta graduada de 1lt.
- Jarra metálica.
- Báscula de plataforma de hasta 250 kg.
- Nivel de burbuja.
- Depósitos de 16 lt.
- Piedra braza: basalto.

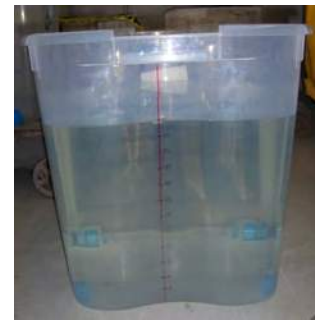


Figura 9.5: Arriba, depósito de 83 lt. Izquierda, probeta y jarra metálica. Centro, báscula de plataforma. Derecha, nivel de burbujas, depósito de 16 lt y piedra braza. (Elaboración propia)

a) Determinar el volumen del depósito a utilizar.

Se utilizó un depósito plástico para contener las muestras de estudio, fue seleccionado en función a la similitud geométrica y volumétrica con los gaviones construidos como muestra de envolvente porosa.

El depósito es de 0.50X0.45X0.40cm (L – H – W) su volumen total es de 83 lt, a pesar de que los gaviones muestra contienen mayor volumen (108 lt) se prefirió un depósito de menor capacidad pero que tuviera una geometría más cercana a la de un muro. Otro tipo de depósitos contienen mayor capacidad, sin embargo la geometría de estos dista de la forma rectangular común para un muro, por ejemplo los depósitos cilíndricos.

Utilizando la probeta, se graduó el depósito hasta llegar a 81 lt, esto representa el 75 % del volumen de los gaviones muestra (108 lt).

b) Determinar el peso del depósito.

Para determinar el peso de la muestra, es necesario también conocer el peso del depósito para que este no se incluya en la estimación.

W depósito	2.00	kg
V _{total}	81.00	lt

c) Determinar el tamaño del agregado a utilizar.

Se determinó el coeficiente de porosidad de tres muestras, estas consisten en el depósito descrito anteriormente relleno de piedras hasta alcanzar los 81 lt. El criterio para el llenado del depósito es tratar de obtener la muestra lo más compacta posible y por tanto acomodar el mayor número de rocas al interior de este.

Las dos primeras muestras se rellenaron con piedras de tamaño relativamente similar entre ellas, aproximadamente entre 10 y 15 cm. La tercer muestra se constituyó de una muestra mixta, rocas de 20 cm y rocas de menor tamaño entre estas. Esperando obtener una muestra aún más compacta, como se observará en los resultados, esta fue efectivamente la más densa.

d) Determinar el número de piedras por muestra y peso.

		Seca (kg)	
	Tamaño	No. de piedras	W muestra
Muestra 1	10 a 15 cms	100.00	94.00
Muestra 2		116.00	102.00
Muestra 3	Mixto	84.00	109.00

Tabla 9.3: Tamaño de las piedras de relleno para cada una de las muestras, número de ellas dentro del depósito hasta alcanzar los 81 lt y el peso de cada muestra seca. (Elaboración propia)



Figura 9.6: Llenado de muestras para determinar el coeficiente de porosidad. De izquierda a derecha, muestra 1, 2 y 3. Una vez alcanzada la marca de los 81 lt se pesó cada una de las muestras utilizando la báscula de plataforma.

e) Obtener el volumen del vacío (agua o aire).

Para obtener el volumen del vacío, a cada muestra rellena de piedras se le agregó agua para desplazar el aire entre las rocas y poder medirlo. La medición del volumen de agua se tomó en tres momentos. El primero, justo después de alcanzar la marca de los 81 lt. El segundo 120 minutos después, esperando que la piedra absorbiera una cierta cantidad de agua. Al mismo tiempo se vibró el depósito para eliminar burbujas de aire. El tercer momento 24 h. después, esperando que la muestra llegara a estar saturada y por tanto hubiera que agregar un poco más de agua para alcanzar la marca de los 81 lt.

	Inicial	120min después	24 hrs después	Mojada (kg) W muestra	Agua restante
	Vv (agua agregada, lts)				Vv Total (lts)
Muestra 1	37.00	1.83	0.00	135.00	37.50
Muestra 2	37.60	1.00	0.96	141.00	36.00
Muestra 3	35.00	1.00	0.00	144.00	34.00
		* vibrado		* volumen del vacío	

Tabla 9.4: Volumen de agua agregada a cada una de las muestras para alcanzar la marca de los 81 lt. Se observa que después de vibrar el depósito y esperar 120 minutos, se tuvo que agregar un litro más de agua y casi dos litros para la muestra número 1. Únicamente la muestra número 2 requirió de casi un litro más de agua 24 h. después. Se indica también el peso de la muestra mojada y la última casilla se refiere a la cantidad de agua restante en el depósito después de sacar las piedras, esto con el fin de corroborar la cantidad total de agua que se agregó a cada muestra. Este último valor es ligeramente menor al Vv Total ya que una cierta cantidad de agua queda superficialmente o es absorbida por las piedras. El volumen del vacío está representado por el volumen final de agua agregada para cada muestra, se observa que es casi el 50 % del volumen total del depósito de 81 lt.



Figura 9.7: Izquierda y centro, agregado de agua en muestra. Derecha, burbujas en muestra después de vibrado.

f) Obtener el volumen del sólido, (piedras).

El volumen del sólido puede deducirse al restar del volumen total de la muestra (81 lt) el volumen total de agua agregada para cada uno de los casos.

	V _{total}	agua agregada	piedras
		Vv Total (lts)	V sólido (lts)
Muestra 1	81.00	38.83	42.17
Muestra 2		39.56	41.44
Muestra 3		36.00	45.00
		* volumen del vacío	* volumen del sólido

Tabla 9.5: Estimación del volumen que ocupa el sólido (piedras), puede observarse que para un volumen total de 81 lt de cada muestra, casi el 50 % es vacío. (Elaboración propia)

g) Estimar la porosidad de la muestra.

Una vez obtenido el volumen del vacío es decir de los poros, puede calcularse el coeficiente de porosidad para cada una de las muestras.

$$\epsilon = \frac{V_f}{V_o} \quad \text{Ecuación 1: Para determinar el coeficiente de porosidad. Fuente Terblanche, 2006.}$$

Donde: ϵ = Coeficiente de Porosidad
 V_f = Volumen de los poros
 V_o = Volumen total del material

	V _o	V _f	piedras	" ϵ "
		Vv Total (lts)	V sólido (lts)	Porosidad
Muestra 1	81.00	38.83	42.17	0.479
Muestra 2		39.56	41.44	0.488
Muestra 3		36.00	45.00	0.444
		* volumen del vacío	* volumen del sólido	0.471

Tabla 9.6: Estimación del coeficiente de porosidad para tres muestras, se determinó en un 47% en promedio. (Elaboración propia)

II. Análisis de Densidad.

La densidad "ρ" se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de un material, es el cociente de la masa de un cuerpo entre el volumen que ocupa. Y es necesario conocerla para estimar el retardo térmico del material.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ecuación 2: Para determinar la densidad dividiendo el peso entre el volumen de la muestra.

En el presente análisis se obtuvo mediante dos métodos. El primero se dedujo de los datos obtenidos en la medición experimental del coeficiente de porosidad, donde se determinó la densidad del sistema (piedras + aire) y también del material por separado (piedras). El segundo mediante una medición directa de la densidad de tres muestras de piedras, donde se obtuvo la densidad únicamente del material.

	Seca (kg)	Piedras		"ε"	V _{total}	V _{sólido}
		W muestra	V sólido (lt)		(m ³)	Porosidad
Muestra 1	94.00	42.17	0.042	0.479	1,160.49	2,229.07
Muestra 2	102.00	41.44	0.041	0.488	1,259.26	2,461.39
Muestra 3	109.00	45.00	0.045	0.444	1,345.68	2,422.22
		* volumen del sólido			1,255.144	2,370.895
					sistema	material

Tabla 9.7: Estimación de la densidad del sistema gavión y densidad del material por sí solo. Nótese que la densidad del sistema en su totalidad es casi del 50% de la densidad del material, esto debido a la alta porosidad. Por ejemplo para la muestra 1, 94 kg entre 81 lt totales ó 94 kg entre 42.17 lt, se obtiene la densidad del sistema completo o la densidad tan solo del material respectivamente. (Elaboración propia)

La medición directa de la densidad se realizó a partir de 3 muestras y se obtuvo mediante el método de desplazamiento de fluidos. Primero se determinó el peso de cada muestra. Segundo, se utilizó un depósito de 16 lt y se graduó hasta los 7 lt. Posteriormente se introdujo cada una de las muestras en el depósito vacío y se midió la cantidad de agua necesaria a agregar para alcanzar la marca de los 7 lt, en el caso de la muestra número 2 debido a sus proporciones se requirió utilizar una marca a 8 lt. Con esto se obtuvo el volumen que ocupa cada muestra.



Figura 9.8: Muestras para medición de densidad.



Figura 9.9: Izquierda, depósito graduado a 7 y 8 lt. Y muestras de basalto para estimación de densidad y porcentaje de absorción. Derecha, Muestra número 2 en depósito.

	W muestra	marca	agua agregada	Volumen (lt)	(m ³)	ρ (kg/m ³) Densidad
Muestra 1	2.87	7.00	5.715	1.285	0.0013	2,229.57
Muestra 2	2.66	8.00	6.780	1.220	0.0012	2,178.28
Muestra 3	3.05	7.00	5.680	1.320	0.0013	2,310.61
* volumen del sólido						2,239.486

Tabla 9.8: Medición de la densidad del material para tres muestras. Nótese que la densidad estimada para el material en la tabla anterior es de 2,370.895 kg/m³ promedio de las tres muestras. Mientras que la medición directa para tres muestra indica un promedio de 2,239.486 kg/m³, una diferencia del 5.5%. (Elaboración propia)

Para comparar los datos de densidad encontrados para piedras de tipo basalto en este análisis se muestra a continuación una tabla de densidad y conductividad reportada en la NOM-008-ENER-2001 para cuatro tipos de piedra.

Propiedades térmicas de distintos materiales NOM -008		
Material	Densidad kg/m ³	Conductividad (W/m K)
Piedras		
Caliza	2,180.00	1.4
Granito, basalto	2,600.00	2.5
Mármol	2,500.00	2

Tabla 9.9: Propiedades térmicas reportadas en la NOM-008-ENER-2001 para distintos tipos de piedras.

III. Porcentaje de absorción.

Para apreciar que tanto depende el coeficiente de porosidad del sistema gavión de la porosidad en sí del material de relleno, se complementó con una medición del porcentaje de absorción de las 3 muestras anteriormente citadas.

Según el estándar ASTM C127 – 12, la absorción de un agregado puede definirse como el incremento de masa debido a la penetración de agua dentro de los poros de las partículas dentro de un periodo establecido de tiempo, pero sin considerar el agua adherida a la superficie exterior de las partículas. La humedad absorbida se expresa como un porcentaje de la masa seca, es decir como un porcentaje del peso de la muestra seca.

La prueba experimental se realizó para las tres muestras obteniendo el cociente del peso del agua absorbida por la muestra (ph) entre el peso de la muestra seca (ps), para esto se saturaron las muestras de agua durante 48 horas al término de este tiempo se retiran y se secan superficialmente con un paño absorbente y se pesan (ASTM C127 – 12).

$$Absorción = \frac{(Ph - Ps)}{Ps} 100$$

Ecuación 3: Para estimar el porcentaje de absorción del agregado (ASTM C127-12) en relación a la masa.

$$Absorción = \frac{Volumen\ del\ agua\ absorbida}{Volumen\ de\ la\ muestra} 100$$

Ecuación 4: Para estimar el porcentaje de absorción del agregado en relación al volumen.

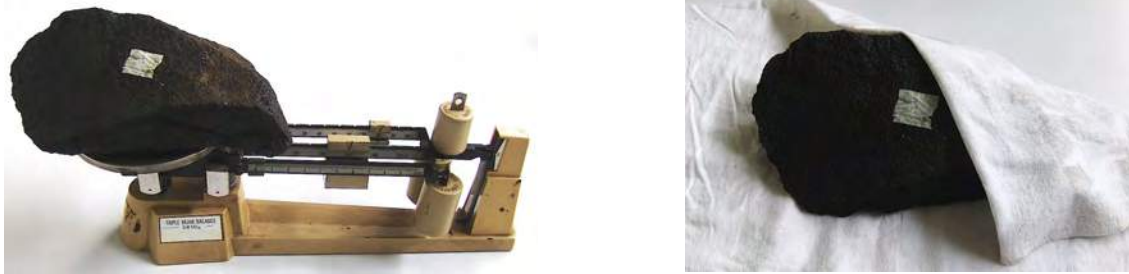


Figura 9.10: Izquierda, báscula y muestra húmeda número 1. Derecha, muestra y paño absorbente antes del pesado.

	P_s (g)	P_h (g)	Diferencia (g)	Volumen (cm ³)	masa % Absorción	volumen %
Muestra 1	2,657.50	2,674.5000	17.0000	1,220.0000	0.6397	1.3934
Muestra 2	3,050.00	3,054.5000	4.5000	1,320.0000	0.1475	0.3409
Muestra 3	2,865.00	2,880.0000	15.0000	1,285.0000	0.5236	1.1673
					Σ 0.4369	0.9672

Tabla 9.10: Porcentaje de absorción para tres muestras de roca tipo basalto. La absorción puede expresarse como porcentaje de la masa (ASTM C127 – 12) o como porcentaje del volumen del material. Nótese que el promedio de porcentaje de absorción de las tres muestras tanto en relación a su masa como al volumen es menor al 1%. (Elaboración propia)

Discusión del análisis de porosidad y densidad.

Las pruebas experimentales para el sistema gavión muestran un coeficiente de porosidad promedio del 47.1% y una densidad de 1,255 kg/m³. Mientras que la densidad del material base (basalto) es de 2,239 kg/m³ y el % de absorción es menor al 1%. De lo que se deduce que la densidad del sistema se ve disminuida cerca de la mitad debido a la alta porosidad, a casi la mitad de su masa. Y que la alta porosidad del sistema gavión no depende de la porosidad del material base.

Estos resultados apuntan primero que un sistema de envolvente con una porosidad del 47% es posible que promueva la ventilación debido a la relación sólido vacío. Y segundo que el retardo térmico del sistema se verá disminuido en comparación con una envolvente sólida del mismo material, simplemente porque posee menor masa a calentar.



Figura 9.11: Gavión muestra para evaluación cómo envolvente porosa. (Elaboración propia)

9.3 Análisis de ventilación – velocidad, volumen y dirección del viento.

Cómo se mencionó anteriormente el objetivo de la evaluación de desempeño es demostrar que es posible alcanzar los mecanismos determinados por medio de una envolvente porosa a partir de gaviones de piedra. Con este criterio, el análisis de ventilación está orientado a determinar la tasa de ventilación a través de una envolvente de gaviones de piedra. Esto implica averiguar la velocidad, el volumen y la trayectoria del viento a través del gavión muestra. Para esto se diseñó una metodología para cada una de las características a conocer.

I. VELOCIDAD.

Metodología

(Metodología y análisis de resultados para el estudio de velocidad y trayectoria del viento, desarrollados con la asesoría del Dr. César Augusto Real Ramírez).

- a) Establecer las condiciones iniciales para el estudio.
- b) Obtener una muestra porosa y no porosa para compararlas.
- c) Determinar una matriz de puntos de medición.
- d) Determinar la velocidad para cada uno de los puntos de la matriz.
- e) Determinar el gradiente de velocidad entre la muestra sólida y la porosa.

Material y equipo empleado.

- a) Muestra porosa (47% promedio) y muestra sólida (0%).
- b) Túnel de viento (Laboratorio arquitectura bioclimática, UAM Azcapotzalco).
- c) Tubos Pitot tipo L, Dwyer series 160.
- d) Variador de velocidad, Yaskawa 616PC5.
- e) *Data logger* Kestrel 4,200.
- f) Transmisor de presión diferencial (manómetro) Dwyer.
- g) *Software* LabVIEW 8.5 para procesamiento de datos.



Figura 9.12: Gavión de piedras como prototipo de envolvente porosa y muestra sólida a partir de forrar con un material rígido la muestra original. (Elaboración propia)



Figura 9.13: Izquierda, túnel de viento UAM-A. Centro, tubo Pitot tipo L. Derecha, variador de velocidad, Yaskawa 616PC5. (Elaboración propia)

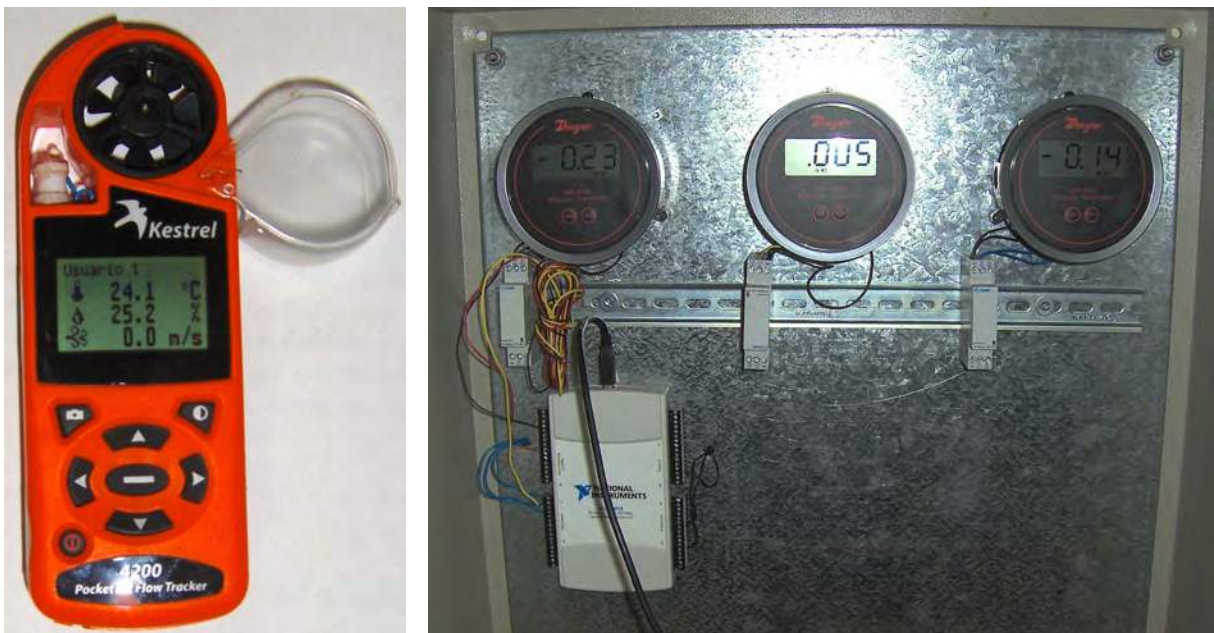


Figura 9.14: Izquierda, data logger Kestrel 4,200. Derecha, Transmisor de presión diferencial. (Elaboración propia)

a) Establecer las condiciones iniciales para el estudio.

Se establecieron las siguientes condiciones que permitieran aumentar la certeza de los resultados a obtener, principalmente orientadas a buscar buenas prácticas en el uso del túnel de viento como herramienta de investigación.

- i) Se rectificó que las 3 puertas que dan acceso a el área de pruebas del túnel de viento cerraran correctamente para reducir infiltraciones de aire.
- ii) Se cercioró que el equipo estuviera libre de polvo a su interior.
- iii) Se redujo en su mayoría los objetos que se encuentran al interior del espacio que alberga el túnel aerodinámico y que reducen el volumen de aire interior.
- iv) Se ubicó una estructura de madera debajo del túnel que asegurara la integridad física del equipo, debido a que está pensado para modelos arquitectónicos de pequeña escala en comparación con el gavión muestra que tiene un peso cercano a los 120 kg.
- v) Se obtuvieron los valores climáticos de temperatura, humedad relativa y presión barométrica al inicio y al final de cada periodo de medición.
- vi) Medición de velocidad al interior del túnel sin las muestras de estudio, únicamente con la base y apoyos de estas para observar su efecto en el flujo.

b) Obtener una muestra porosa y no porosa para compararlas.

Para apreciar la velocidad del viento en interacción con la muestra de estudio, se decidió comparar esta, entre una muestra porosa (47% promedio) y una muestra sólida (0%), y así para poder determinar el gradiente de velocidad entre uno y otro. Esperando encontrar que la muestra porosa distribuye la energía cinética del viento de forma más uniforme mientras que la estructura sólida promoverá una mayor aceleración del viento hacia las paredes del túnel.

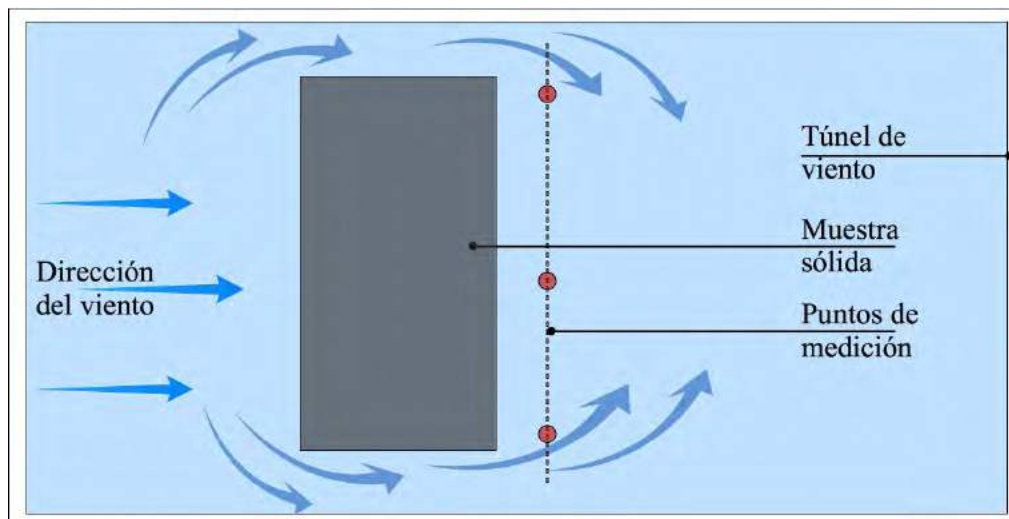


Figura 9.15: Figura esquemática de la comparación de velocidad de viento entre una muestra sólida y una porosa (elaboración propia). La oposición del cuerpo sólido al paso del viento provocará una aceleración en las paredes del túnel de viento.

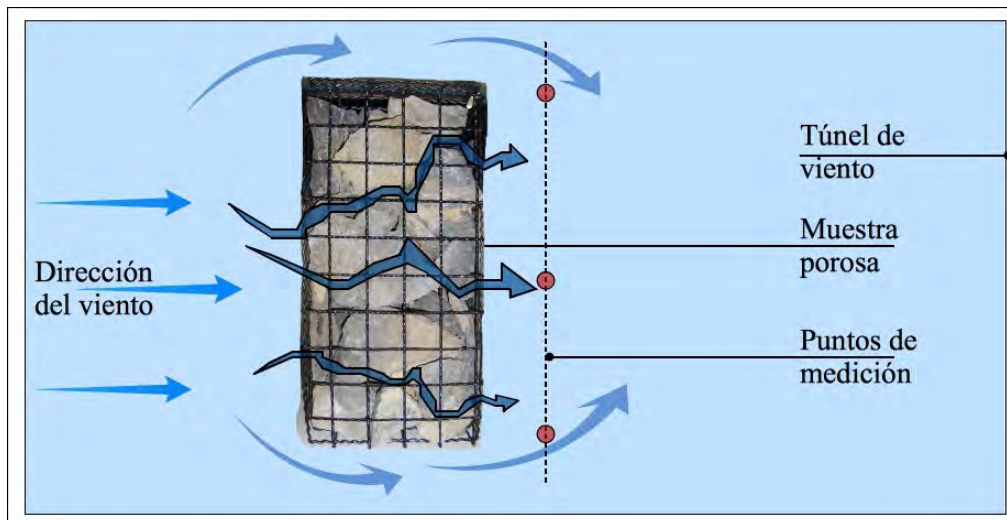


Figura 9.16: Figura esquemática de la comparación de velocidad de viento en relación a una muestra sólida y una porosa (elaboración propia). La oposición del cuerpo poroso al paso del viento provocará una menor aceleración en las paredes del túnel de viento y mayor velocidad al centro en comparación con el sólido.

c) Determinar una matriz de puntos de medición.

Se establecieron los planos (X, Y y Z) antes, al centro y después de la muestra. Cada uno con 15 puntos de medición. Excepto el plano central (Y) donde sólo es posible medir 12. De A a C entre 4 y 5 y los superiores de a y b entre 2.1 y 3.1.

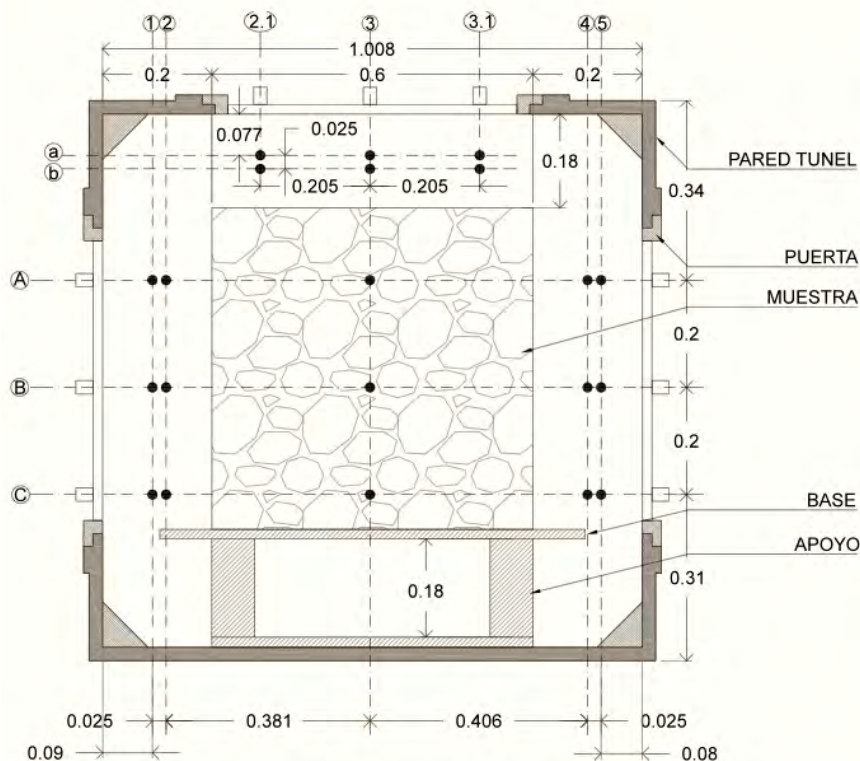


Figura 9.17: Matriz de puntos de medición para un plano tipo. Los puntos superiores a y b entre 2.1 y 3.1 solo se midieron para el plano central Y. (Elaboración propia)

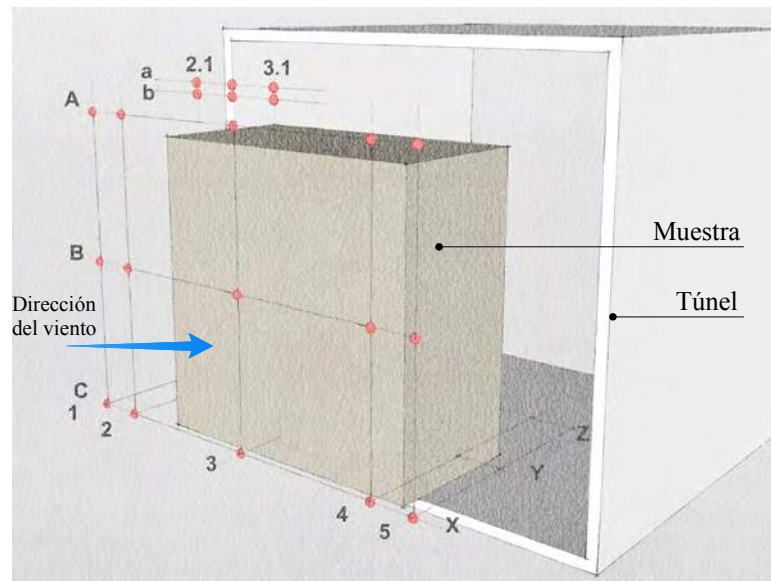


Figura 9.18: Vista tridimensional de los puntos de medición para los tres planos X, Y y Z. La muestra de estudio y el túnel de viento. Los puntos superiores a y b entre 2.1 y 3.1 solo se midieron para el plano central Y. (Elaboración propia)

d) Determinar la velocidad para cada uno de los puntos de la matriz.

i) Medición para el túnel de viento sin muestras.

Se realizaron tres mediciones de velocidad del viento, una para la muestra sólida, otra para la porosa y una más del interior del túnel de viento sin las muestras de estudio, esto con la finalidad de contar con al menos una caracterización básica del equipo y del efecto de la base para las muestras de estudio. La prueba se realizó sin ninguna muestra al interior del túnel pero si se mantuvo la base y apoyos de la muestra para que fuera una constante en las tres pruebas. Todas las pruebas se realizaron a una frecuencia de 10Hz.



Figura 9.19: Izquierda, vista del área de pruebas del túnel de viento sin muestra de estudio. Derecha, vista de la base y apoyos para las muestras de estudio al interior del túnel. Se observa en la base la ranura central para poder producir un plano de luz, para las mediciones de velocidad se obstruye con cinta para que no altere los resultados. (Elaboración propia)

Datos climáticos

Parámetros iniciales 16:00 pm 28/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	69.8
med	22.3	med	45.7
min	19.8	min	35.2

Parámetros iniciales 11:30 am 29/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	22	med	50.4
min	19.8	min	35.5

Presión barométrica	736.5	hPa
---------------------	-------	-----

Presión barométrica	736.5	hPa
---------------------	-------	-----

Parámetros finales 19:00 pm 28/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	22.2	med	47.4
min	19.8	min	35.2

Parámetros finales 12:45 pm 29/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	21.9	med	50.1
min	19.8	min	35.5

Tabla 9.11: Datos climáticos iniciales y finales para la medición de velocidad al interior del túnel de viento, este sin las muestras de estudio. La medición se realizó en dos días y se reportan los datos climáticos determinados mediante el Data logger Kestrel 4,200. Se observa una importante variación entre los valores máximos y mínimos tanto en temperatura como en humedad relativa, comportamiento común para el clima de la ciudad de México. También es posible que el inicio de la temporada de lluvias influya en los parámetros climáticos. (Elaboración propia)

Velocidad del viento – túnel de viento sin muestras.

Plano no. X	Fecha 28/05/14				
A	3.10	3.00	2.70	2.80	2.70
B	2.90	3.00	3.00	2.90	2.90
C	3.00	2.90	3.10	2.90	2.90
Puntos	1	2	3	4	5

Plano no. Y	Fecha 28/05/14				
	1	2	3	4	5
			2.1	3	3.1
		a	2.80	2.60	2.60
		b	2.70	2.50	2.60
A	2.90	2.90		2.80	2.80
B	2.90	2.90		3.00	2.80
C	3.00	3.00		2.90	2.80
Puntos	1	2		3	4

Plano no. Z	Fecha 29/05/14				
A	3.10	3.10	3.10	3.00	3.00
B	3.20	3.20	3.30	3.10	3.10
C	3.50	3.50	3.30	3.20	3.30
Puntos	1	2	3	4	5

Tabla 9.12: Velocidad del viento para los planos X, Y y Z según los puntos definidos en la matriz de medición para el túnel de viento a una frecuencia de 10Hz. (Elaboración propia)

Tomando el punto B-3 como el centro, se observa que el viento se acelera más hacia el lado izquierdo del túnel para los tres planos, en comparación con el lado derecho que siempre presenta una menor velocidad. También resalta que la menor velocidad se presenta en los puntos superiores del plano “Y”, a y b entre 2.1 a 3.1.

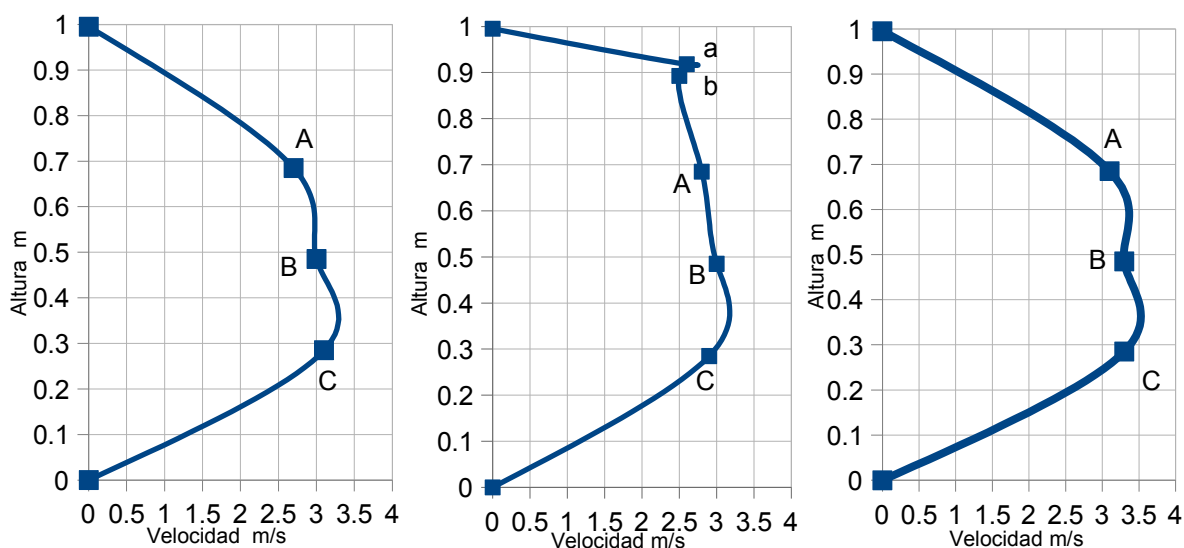


Figura 9.20: Perfiles de velocidad verticales para los planos X, Y, Z, respectivamente, todos en el eje 3. Para el túnel de viento sin muestras y para una frecuencia de 10 Hz. Para el plano Y se realizaron dos puntos superiores de medición extra, a y b, por lo que puede apreciarse un perfil de velocidad más completo. (Elaboración propia)

Por otro lado también se observa que la velocidad del flujo es mayor en la parte baja, para los puntos ubicados en el eje C, en comparación con los puntos superiores ubicados en el eje A. Esto puede ser provocado por los elementos que conforman la base y apoyos de las muestras de estudio.

ii) Medición para la muestra sólida.

La prueba se realizó con la muestra sólida al interior del túnel incluyendo la base y apoyos, a una frecuencia de 10Hz, para los planos X, Y, Z.

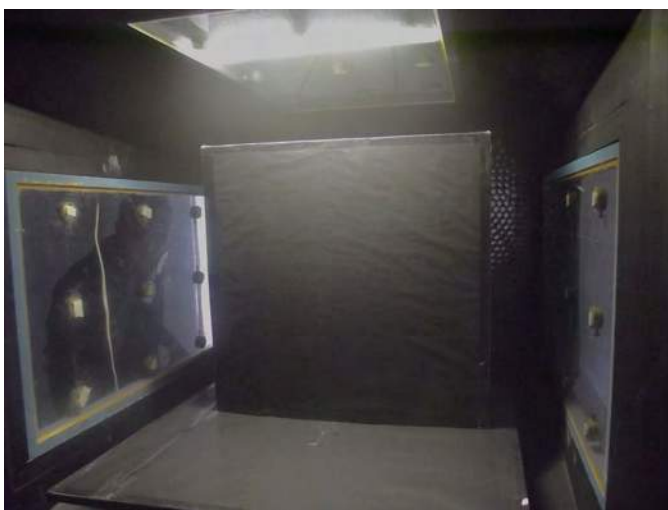


Figura 9.21: Interior del túnel de viento con la muestra sólida y base de apoyo. Fotografía cortesía de Guillermo Terres.

Datos climáticos

Parámetros iniciales 16:45 pm 26/05/14				Parámetros finales 21:00 pm 26/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%	Temperatura	°C	Humedad	%
max	24.5	max	62.8	max	24.5	max	69.8
med	22.8	med	37.4	med	22.5	med	40.9
min	21.6	min	34.8	min	20.1	min	34.8

Presión barométrica	736.5	hPa
---------------------	-------	-----

Tabla 9.13: Datos climáticos iniciales y finales para la medición de velocidad al interior del túnel de viento, para la muestra sólida. La medición se realizó en un día y se reportan los datos climáticos determinados mediante el data logger Kestrel 4,200. Se observa una menor variación en los valores máximos y mínimos en comparación con los reportados para la medición del túnel sin muestras, en particular en la temperatura. (Elaboración propia)

Velocidad del viento - muestra sólida.

Plano no. X				Fecha 26/05/14	
A	2.70	2.90	2.10	2.60	2.90
B	2.60	2.80	2.00	2.60	2.80
C	2.70	2.90	1.90	2.70	2.90
Puntos	1	2	3	4	5

Plano no. Y				Fecha 26/05/14	
		2.1	3	3.1	
	a	4.90	4.60	4.90	
	b	4.80	4.30	3.40	
A	3.70	4.50	0.00	4.60	4.60
B	3.40	4.50	0.00	4.60	4.70
C	0.90	4.20	0.00	4.50	4.60
Puntos	1	2	3	4	5

Plano no. Z				Fecha 26/05/14	
A	4.90	4.60	1.90	2.80	4.70
B	4.80	4.40	2.00	2.80	4.40
C	4.30	3.10	1.90	1.90	3.20
Puntos	1	2	3	4	5

Tabla 9.14: Velocidad del viento para los planos X, Y y Z para la muestra sólida a una frecuencia de 10Hz. Para el plano Y, los puntos de A a C entre 1 y 2, se midieron con el anemómetro del Data logger Kestrel 4,200 debido a que los tubos Pitot tipo L son demasiado largos para acceder por el extremo izquierdo. (Elaboración propia)

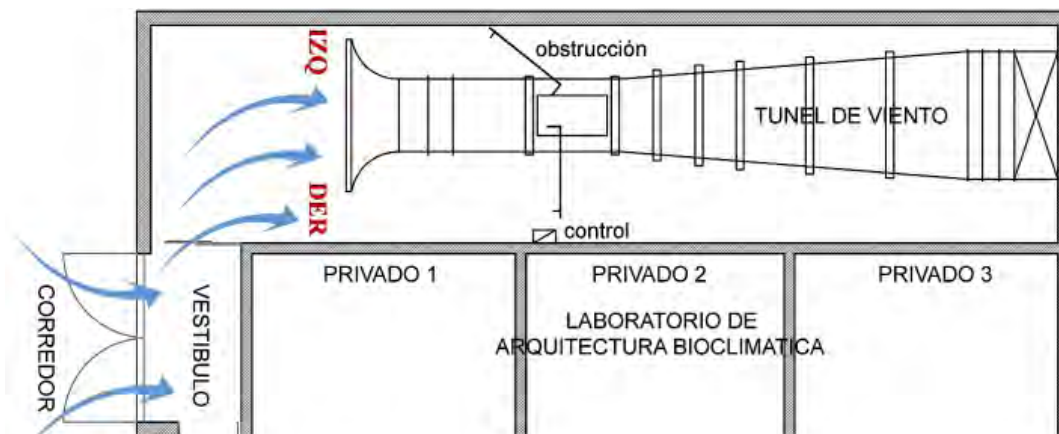


Figura 9.22: Plano esquemático de la ubicación del túnel de viento de la UAM Azcapotzalco. Nótese que la parte superior del área de pruebas no permite el ingreso de un tubo Pitot de 50". Importante también, que el equipo debe tomar el aire de forma lateral, lo que es probable que modifique el comportamiento del flujo. (Elaboración propia)

En las velocidades obtenidas para los tres planos se puede deducir que el flujo indica una disminución en la velocidad al encontrar la oposición de la muestra sólida, de ahí que para los tres planos las velocidades en el eje 3 sean menores mientras que en los extremos es mayor. Para los planos (Y, Z) la velocidad del flujo al rededor del sólido se incrementa aún más y de manera no uniforme, ya que se observa mayor velocidad al lado derecho para el plano Y mientras que para el plano Z es el extremo opuesto.

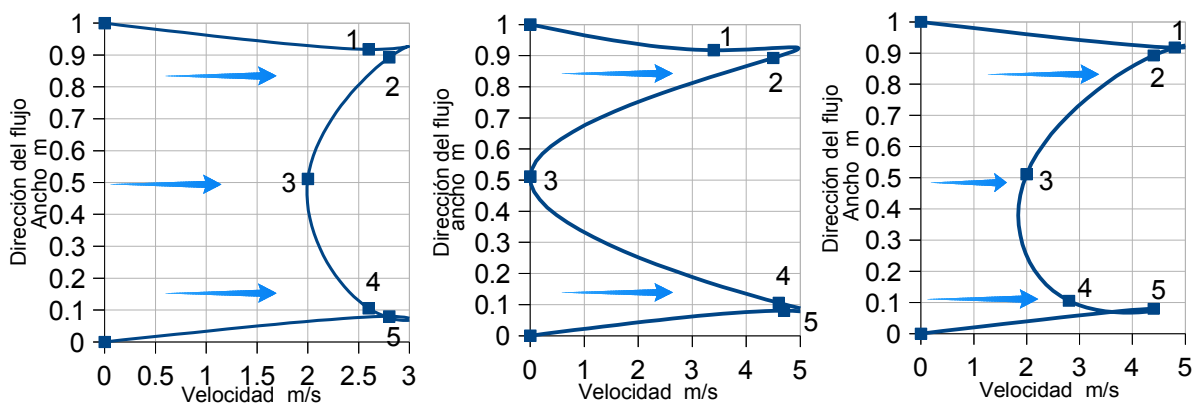


Figura 9.23: Perfiles de velocidad horizontales para los planos X, Y, Z, respectivamente. Todos para el eje B a 10 Hz. (Elaboración propia)

En cuanto a la utilización de un equipo diferente para obtener los datos del extremo izquierdo en el plano Y, reduce la validez de estos ya que las diferencias entre los equipos es importante tanto en el margen de error cómo en la alteración que producen en sí mismos al comportamiento del flujo. Por otro lado como se muestra en el plano de ubicación del túnel de viento, la disposición del equipo en el espacio es probable que influya en el comportamiento del viento.

lii) Medición para la muestra porosa.

La prueba se realizó durante dos días con la muestra porosa al interior del túnel incluyendo la base y apoyos, a una frecuencia de 10Hz, para los planos X, Y, Z.



Figura 9.24: Derecha, muestra porosa y tubo Pitot. Izquierda, muestra porosa en túnel.

Datos climáticos

Parámetros iniciales 17:00 pm 29/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	21.9	med	50.8
min	19.8	min	35.6

Parámetros iniciales 11:30 am 30/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	21.9	med	51.5
min	19.8	min	35.7

Presión barométrica	735.9	hPa
---------------------	-------	-----

Presión barométrica	735.5	hPa
---------------------	-------	-----

Parámetros finales 18:30 pm 29/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	21.9	med	50.5
min	19.8	min	35.6

Parámetros finales 15:30 pm 30/05/14			
Temperatura	°C	Humedad	%
max	31.1	max	70.8
med	21.9	med	51.7
min	19.8	min	35.7

Tabla 9.15: Datos climáticos iniciales y finales para la medición de velocidad al interior del túnel de viento, para la muestra porosa. La medición se realizó en dos días y se reportan los datos climáticos determinados mediante el Data logger Kestrel 4,200. También con variaciones importantes en temperatura y humedad relativa. (Elaboración propia)

Velocidad del viento - muestra porosa.

Plano no. X	Fecha 29/05/14				
A	2.70	2.70	2.20	2.60	2.60
B	2.60	2.60	2.10	2.50	2.50
C	2.70	2.70	2.20	2.70	2.60
Puntos	1	2	3	4	5

Plano no. Y	Fecha 29/05/14						
			2.1	3	3.1		
		a	3.60	3.70	3.80		
		b	3.80	3.80	3.90		
A	obstrucción	obstrucción		0.00		3.50	3.40
B	obstrucción	obstrucción		0.00		3.60	3.50
C	obstrucción	obstrucción		0.00		3.50	3.60
Puntos	1	2		3		4	5

Plano no. Z	Fecha 30/05/14				
A	4.10	4.20	1.90	4.10	4.20
B	4.40	4.40	2.30	4.50	4.50
C	4.50	4.50	2.30	3.50	4.10
Puntos	1	2	3	4	5

Tabla 9.16: Velocidad del viento para los planos X, Y y Z para la muestra porosa a una frecuencia de 10Hz. Para el plano Y, los puntos de A a C entre 1 y 2, se decidió indicarlos únicamente como obstrucción ya que al tomarlos con el Data logger Kestrel 4,200 las variaciones en las velocidades eran muy grandes. (Elaboración propia)

En general las velocidades obtenidas para la muestra porosa, son mucho más estables. Tomando el punto B-3 como el centro, se puede observar una simetría en las velocidades que rodean la muestra. Por ejemplo para el plano X, los puntos C-1 y C-5 son muy similares entre si. Lo mismo que los puntos C-2 con C-4. Si se compara los puntos A-1 con C-5 ó C-1 con A-5 encontramos un comportamiento similar.

e) Determinar el gradiente de velocidad entre la muestra sólida y la porosa.

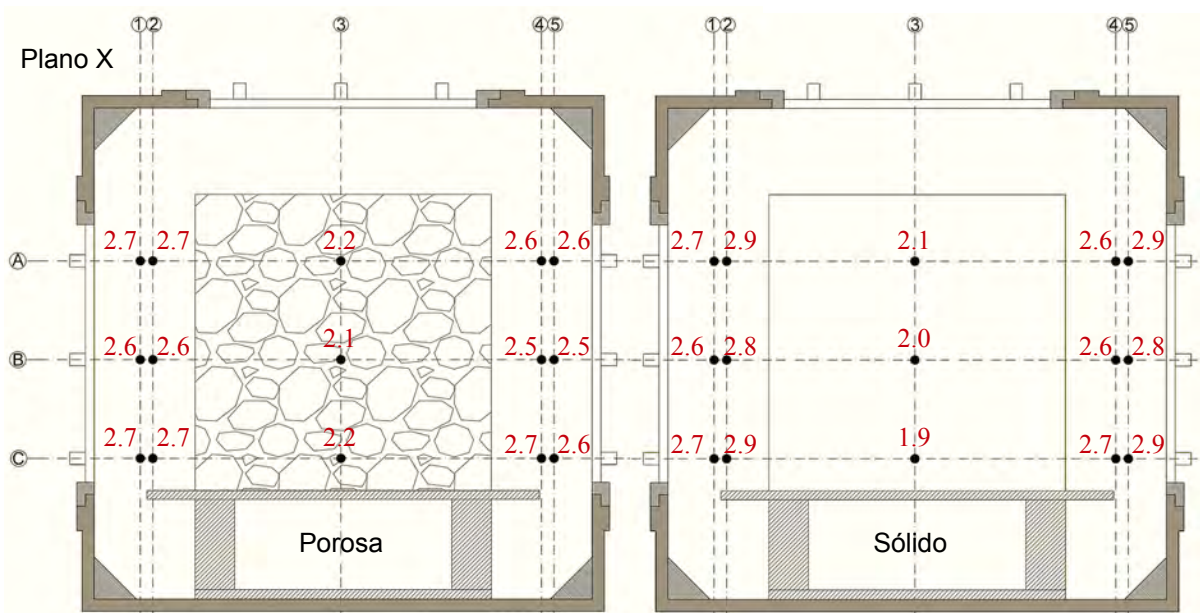


Figura 9.25: Comparación de velocidades para una muestra porosa y una sólida para el plano X a 10 Hz. En general las velocidades son similares entre las dos muestras, ligeramente mayores para los puntos alrededor de la muestra sólida. Sin embargo los puntos al centro de la muestra porosa muestran mayor velocidad, 4% para los puntos A y B. 13% para el punto C. (Elaboración propia)

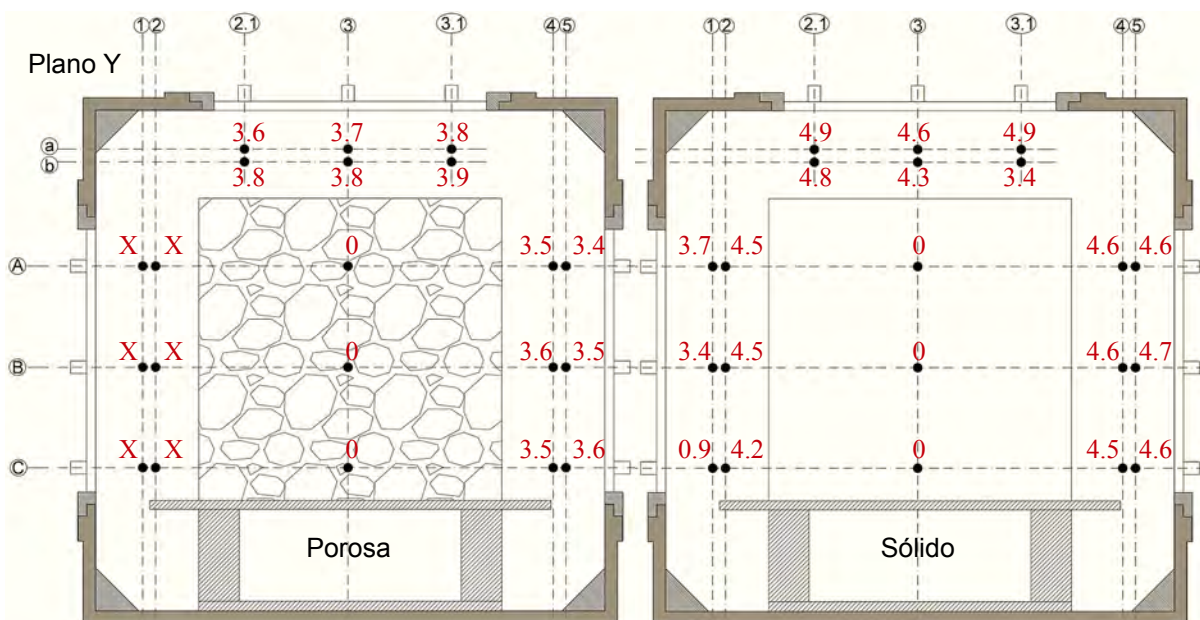


Figura 9.26: Comparación de velocidades para una muestra porosa y una sólida para el plano Y a 10 Hz. Las velocidades del flujo son claramente superiores alrededor del sólido, del 21% al 26%. (Elaboración propia)

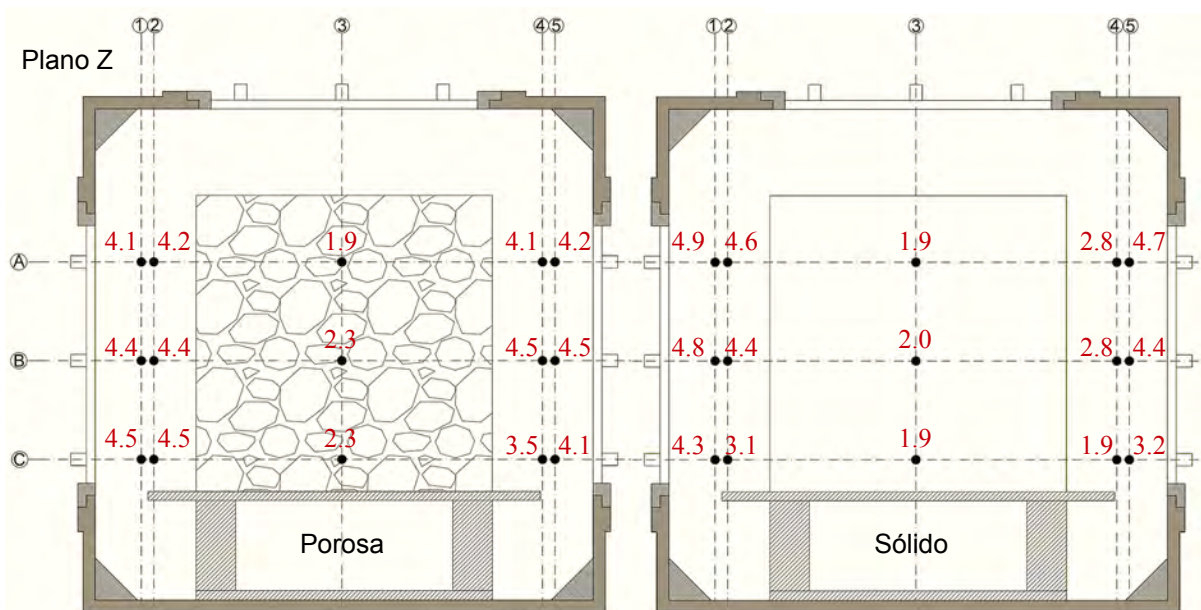


Figura 9.27: Comparación de velocidades para una muestra porosa y una sólida para el plano Z a 10 Hz. El plano Z es el más representativo para apreciar el paso del viento a través del gavión. La velocidades obtenidas para la muestra porosa son muchos más estables en comparación con las reportadas para el sólido que muestra una mayor aceleración hacia el lado izquierdo. Para los puntos intermedio del eje 3, la muestra porosa indica una mayor velocidad del flujo, del 13% para el punto B3 y de 17% para el C3. (Elaboración propia)

El comportamiento del flujo en interacción con las muestras puede explicarse debido a que la envolvente porosa distribuye de forma más uniforme la energía cinética del viento, en comparación con una obstrucción sólida que produce mayor aceleración del flujo al rededor de este.

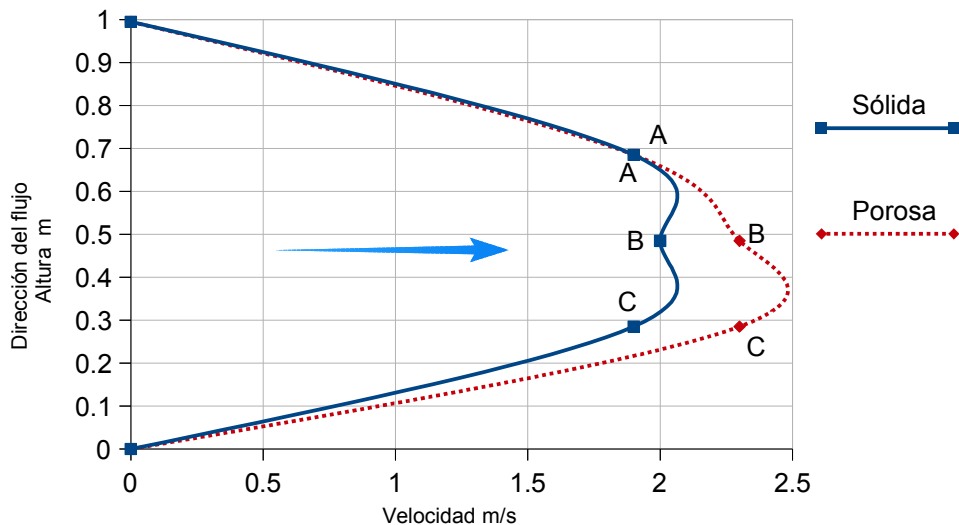


Figura 9.28: Perfiles de velocidad verticales para el plano Z en el eje central 3 a 10 Hz. Se indica el gradiente de velocidad entre la muestra porosa y la sólida. (Elaboración propia)

Comparando los datos obtenidos en la medición para el túnel sin muestras con los reportados para las dos envolventes, se observa que para la medición sin muestras y la del sólido se produce una asimetría en el comportamiento del flujo al presentarse una mayor aceleración lateral; que no se presenta para el caso de la envolvente porosa. Por otro lado la aceleración cercana a la base que se observó para la medición del túnel sin muestras, no se presenta en el caso de las muestras de estudio.

II. VOLUMEN.

Para conocer el volumen de aire que atraviesa la muestra porosa se utilizaron los datos obtenidos en la prueba experimental de porosidad para aplicarlos a la ecuación de caudal y así poder deducir la cantidad de flujo. El objetivo es comparar el volumen de aire que pasa a través de un gavión con el volumen que atraviesa una abertura de la misma área del gavión muestra pero considerada como totalmente abierta, es decir con un coeficiente de porosidad de 1.

Metodología.

- Determinar el área de abertura para el paso del viento.
- Determinar mediante la ecuación de caudal el volumen de aire que pasa a través de la abertura.
- Determinar el gradiente de volumen de aire entre la muestra porosa y una completamente abierta.

- Determinar el área de abertura para el paso del viento.

Para establecer cual es el área de abertura de una envolvente porosa a base de gaviones, se utilizaron los datos obtenidos en la medición de porosidad; de donde se deduce que el área se puede determinar a partir del volumen de vacío que ocupa la muestra.

Se asume que la porosidad del sistema gavión es constante en toda su masa, así que si el volumen de vacío (m^3) para toda la muestra se estima para un plano tipo, se obtendrá el área de abertura (m^2). El volumen promedio de vacío para las tres muestras es de $0.038m^3$ y dado que el área de abertura es un plano de dos dimensiones (L X A) en m^2 es necesario dividir entre el espesor de la muestra, que como se mencionó es de 0.30 m representando un muro gavión.

	Piedras				"n"
	Vv Total (lt)	Vv Total (m^3)	V sólido (lt)	(m^3)	Porosidad
Muestra 1	38.83	0.039	42.17	0.042	0.479
Muestra 2	39.56	0.040	41.44	0.041	0.488
Muestra 3	36.00	0.036	45.00	0.045	0.444
	38.13	0.038	42.87	0.043	47.07%

volumen del vacío

volumen del sólido

Tabla 9.17: Datos de porosidad para tres muestras, para obtener el área de abertura. (Elaboración propia)

Área de la abertura de entrada		
Área 47% porosa	0.127	m ²
Área 100 % porosa	0.360	m ²

Tabla 9.18: Estimación del área de abertura para un gavión de 0.60 X 0.60 X 0.30m (L X H X W) con 47% de porosidad y de una abertura simple de 0.60 X 0.60m para comparar. (Elaboración propia)

Se consideró que el área de abertura a comparar con la muestra porosa sería la misma área frontal del gavión muestra (0.60 X 0.60m) que se presenta perpendicularmente al paso del viento, completamente abierta.

- b, c) Determinar mediante la ecuación de caudal el volumen de aire que pasa a través de la abertura y el gradiente de volumen de aire entre la muestra porosa y una completamente abierta.

$$Q = \frac{A}{V} \quad \text{Ecuación 5: Para determinar el volumen de aire que pasa a través de la muestra.}$$

Donde: Q= Caudal de flujo que pasa por unidad de tiempo (m³/s).

A= Área de abertura (m²).

V= Velocidad del viento (m/s).

Utilizando los datos de velocidad obtenidos durante el análisis experimental para el túnel sin muestras y el gavión, ambos para el plano Z en el eje central 3. Se obtienen los siguientes volúmenes de aire.

Estimación de Cantidad de Aire a través de la muestra								
Plano no. Z	100% porosa	47% porosa	100% porosa	47% porosa	100% porosa	47% porosa	Diferencia	
	A (m ²)		V (m/s)		Q (m ³ /s)		%	
A	0.360	0.127	3.100	1.900	1.116	0.241	21.639	
B			3.300	2.300	1.188	0.292	24.607	
C			3.300	2.300	1.188	0.292	24.607	
					Σ	1.164	0.275	23.618

Tabla 9.19: Estimación del volumen de aire que atraviesa una muestra 47% porosa de 0.60X0.60m en comparación a una 100% porosa de las mismas dimensiones. Y el gradiente de volumen entre ellas. (Elaboración propia)

Los datos obtenidos permiten apreciar que el volumen de aire que atraviesa una muestra de envolvente porosa a base de gaviones, es en promedio el 23.61 % de la que atravesaría una abertura completamente abierta, como sería una ventana tradicional de 0.60 X 0.60m.

Para ilustrar lo anterior se puede calcular la tasa de renovación de aire requerida para una habitación de 4.0 X 5.0 X 2.8m de altura libre, con 5 personas en su interior en situación de reposo, mediante la siguiente ecuación (García Chávez y Fuentes Freixanet, 2005).

$$V = \frac{g}{C_i - C_e} \quad \text{Ecuación 6: Para estimar la tasa de ventilación necesaria para renovar el aire.}$$

Donde: V= Tasa de ventilación (m³/h).

g= Tasa de emisión de gas contaminante.

C_i y C_e= Concentraciones del gas (%) en la mezcla interior que se introduce para ventilar.

Según reportan García Chávez y Fuentes Freixanet (2005) el aire en zonas urbanas contiene una proporción de CO₂ aproximadamente de 0.07 a 0.1% y no debe rebasarse esta cifra si se quieren evitar efectos nocivos a la salud. Y que un adulto en reposo produce un 0.015 m³/h de CO₂ aproximadamente.

Entonces:

$$V = \frac{0.015}{0.001 - 0.0007} = 50 \text{ m}^3/\text{h/persona}$$

Tasa de ventilación	50.000	m ³ /h/persona
Ocupación=	5.000	personas
Requerimiento	250.000	m ³ /h
	0.069	m ³ /s
Volumen habitación	56.000	m ³
Renovaciones	4.464	renovaciones/h

Q Gavión (47%)	0.275	m ³ /s
	991.380	m ³ /h
Renovaciones	17.703	renovaciones/h

Q Ventana (100%)	1.164	m ³ /s
	4190.400	m ³ /h
Renovaciones	74.829	renovaciones/h

Tabla 9.20: Comparativo de número de renovaciones por hora entre una muestra porosa (47%) y una completamente abierta (100%) en función de la tasa de ventilación de cada una. Calculado para una habitación de 4.0X5.0X2.8m con 5 personas. (Elaboración propia)

Se observa en el ejemplo anterior que para un requerimiento de tan solo 4.46 r/h una ventana completamente abierta consigue 74.82 r/h, mientras que la muestra porosa podría otorgar 17.70 r/h esto es el 23.66% del valor anterior.

III. DIRECCIÓN.

La dirección o trayectoria del viento al interactuar con las muestras de estudio se puede observar de manera experimental realizando visualizaciones. Para esto se utiliza un trazador que permite hacer visible el viento, en este caso humo. Las visualizaciones permiten apreciar los movimientos del flujo al interactuar con objetos, como las muestras de estudio aquí presentadas.

Los resultados obtenidos para estas pruebas son de carácter cualitativo, dado que permiten observar y describir ciertos patrones del flujo al interior del túnel de viento y son complementarios a los resultados cuantitativos de velocidad y volumen anteriormente descritos.

Como se observará en las imágenes y vídeos incluidos, en muchas ocasiones resulta difícil reproducir con claridad los fenómenos vistos en el laboratorio, principalmente por razones técnicas; ya que la captura de estas visualizaciones requiere de equipo profesional que pueda captar fenómenos muy sutiles y de la experiencia para manejarlo. Para maximizar la nitidez de los resultados se diseñó una metodología descrita a continuación.

Metodología.

(Metodología y análisis de resultados para el estudio de velocidad y trayectoria del viento, desarrollados con la asesoría del Dr. César Augusto Real Ramírez).

- a) Determinar los planos donde visualizar la trayectoria del viento.
- b) Fijar puntos para la ubicación de la cámara fotográfica.
- c) Establecer las condiciones ideales para la captura de imágenes.
- d) Determinar la trayectoria del viento para una muestra porosa y no porosa en tres planos.

Material y equipo empleado.

- a) Cámara Nikon D600 y tripié.
- b) Reflector led 50 W luz blanca.
- c) Lámpara fluorescente T5 21 W.
- d) Máquina de humo Antari Z3000II.

- a) Determinar los planos donde visualizar la trayectoria del viento.

Se ubicaron tres planos perpendiculares a la muestra de estudio para poder visualizar la trayectoria del flujo, dos planos laterales y un plano central, numerados del 1 al 3. Cada plano de luz se dividió en sección X, Y, Z; es decir antes, al centro y después de la muestra de estudio.

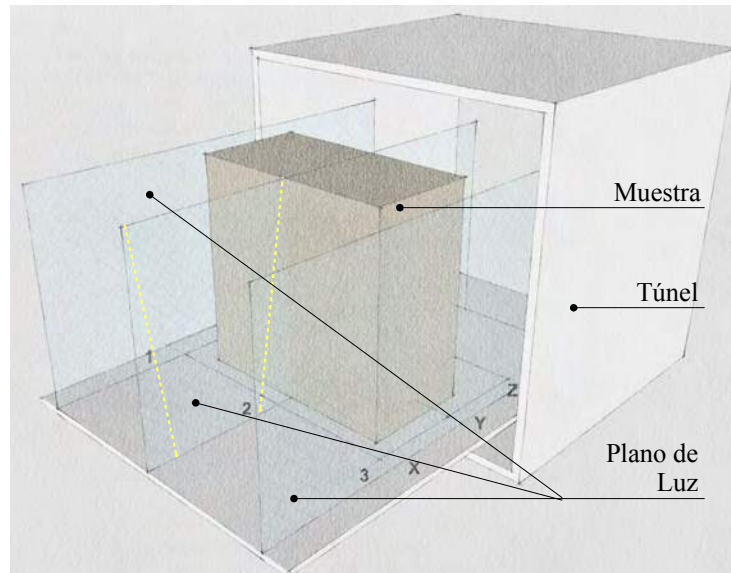


Figura 9.29: Planos de luz para visualizaciones, 1, 2 y 3. El plano 1 en su sección central "Y" no fue posible de capturar debido a las mismas razones de obstrucción presentadas para el análisis de velocidad. (Elaboración propia)

b) Fijar puntos para la ubicación de la cámara fotográfica.

Después de ubicar la cámara fotográfica frente al plano a capturar, se marcaron en el piso los puntos de la ubicación del tripié, con el objeto de mantener la misma distancia paralela entre la cámara y el plano de luz; tanto al desplazarse entre las 3 secciones que componen cada plano cómo para pasar del plano 1 al 2 ó 3.



Figura 9.30: Izquierda, ubicación de cámara fotográfica. Derecha: Ubicación de puntos para desplazamiento de cámara entre planos y secciones de estos. (Elaboración propia)

c) Establecer las condiciones ideales para la captura de imágenes.

Las condiciones ideales para capturar los fenómenos observados en laboratorio constan de dos objetivos, primero que el plano de luz sea lo más claro y definido posible. Segundo que el trazador se distribuya de forma lo más uniformemente posible dentro del espacio que alberga el túnel de viento para no modificar su trayectoria al momento de entrar al mismo.

El primer objetivo se logra al conseguir que la única fuente de luz sea la proveniente del plano a capturar, para esto se colocaron papeles de color negro en las puertas de acceso a la zona de pruebas, la base de apoyo a las muestras, las muestras y cualquier otro objeto que pudiera reflejar luz se pintaron de negro.

El plano de luz se logra abriendo una ranura en la base de apoyo, esta se realizó tratando de que fuera lo más delgada posible (2mm), se selló con cinta transparente que impidiera el paso del viento pero que permitiera el paso de la luz. Una vez ubicada la fuente de luz debajo de la base, se envolvió con tela negra que impidiera la fuga de luz por debajo de la base.

Para el plano central 2, se utilizó el reflector led de 50W, para los planos laterales 1 y 3 se utilizó la lámpara fluorescente T5 21 W ya que estos planos están muy cerca de las paredes del túnel y existe poco espacio. Debido a esto la calidad del plano central es mejor que los planos laterales.

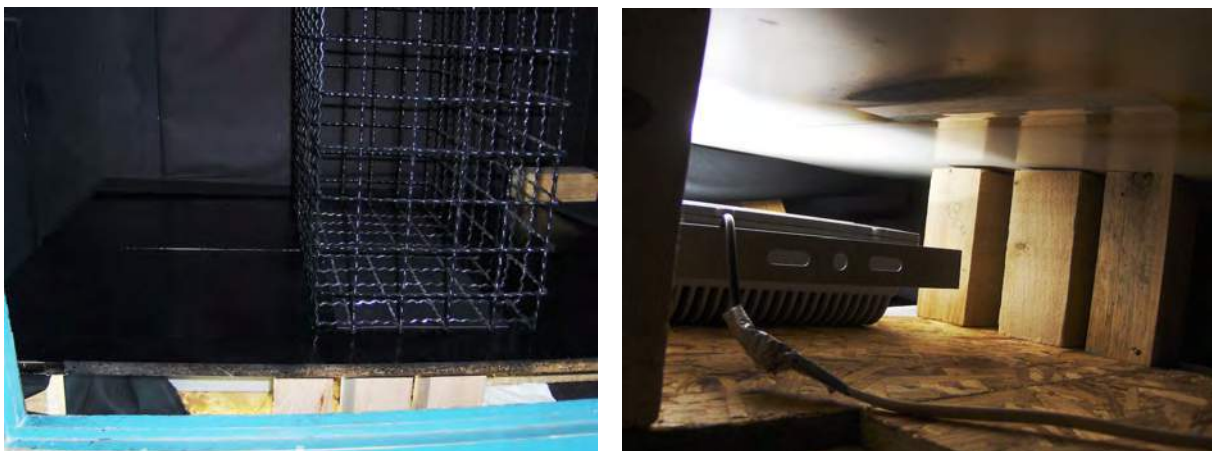


Figura 9.31: Izq. interior del túnel de viento, con la base y la muestra pintadas de negro, se observa al centro de la base la ranura para formar el plano de luz central y al fondo una de las puertas de la zona de pruebas obstruidas con papel de color negro. Der. vista por debajo de la base de apoyo y el reflector led. Al fondo se observa la tela negra que contiene la luz de fugarse por los lados de la base. Los planos de luz 1 y 3, se lograron colocando tablas laterales, únicamente dejando una ranura de 2mm. (Elaboración propia)

Para conseguir el segundo objetivo, utilizando la máquina de humo se inunda de este el espacio que contiene el túnel de viento, para posteriormente arrancar el equipo y esperar 2 minutos para capturar el plano, con el objetivo de que el flujo se haya estabilizado.



Figura 9.32: Izquierda, operación de la máquina de humo. Derecha, proceso de inundar el espacio de humo antes de realizar las visualizaciones. (Elaboración propia)

- d) Determinar la trayectoria del viento para una muestra porosa y no porosa en tres planos.

Se muestra a continuación una comparación de la trayectoria del viento para una muestra sólida y una porosa, en base a una secuencia y discusión de imágenes de cada plano de estudio (1,2,3) en sus tres secciones (X,Y,Z). Sin embargo se recomienda la revisión de los vídeos que se adjuntan de forma digital a este documento, iniciando el análisis con el plano central, número 2.

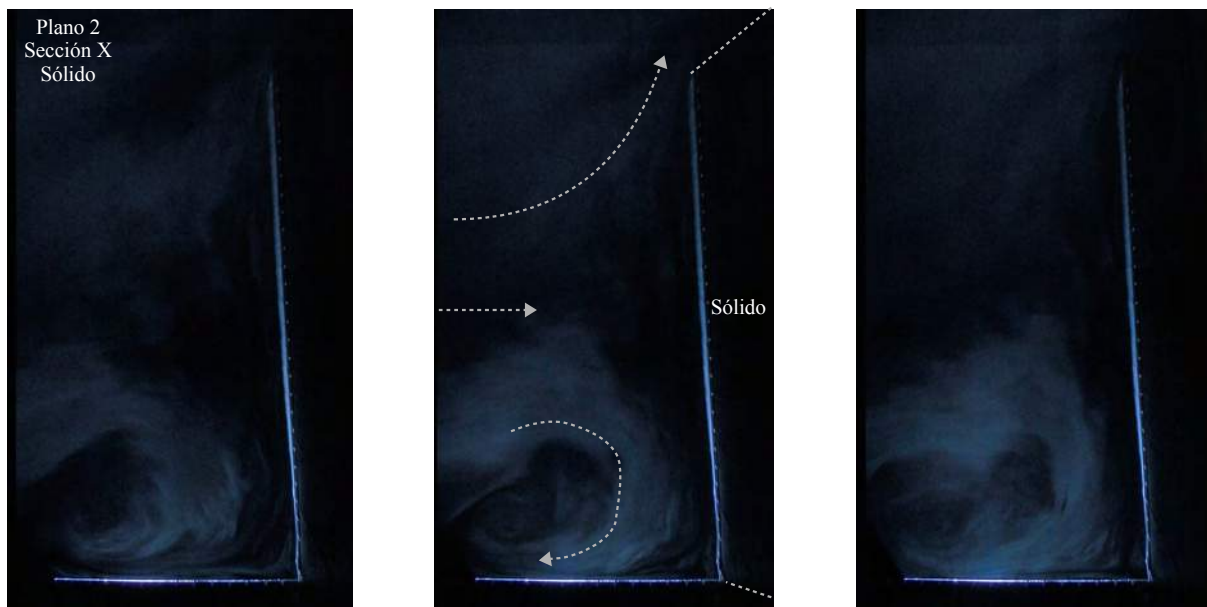


Figura 9.33: Secuencia de izquierda a derecha de la trayectoria del flujo para el plano indicado. Se observa la existencia de una zona de recirculación en la base, ocupando la mitad de la altura aproximadamente. La parte superior del flujo se separa para desplazarse por arriba de la muestra. Visualización realizada a 2.5 Hz y 17% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

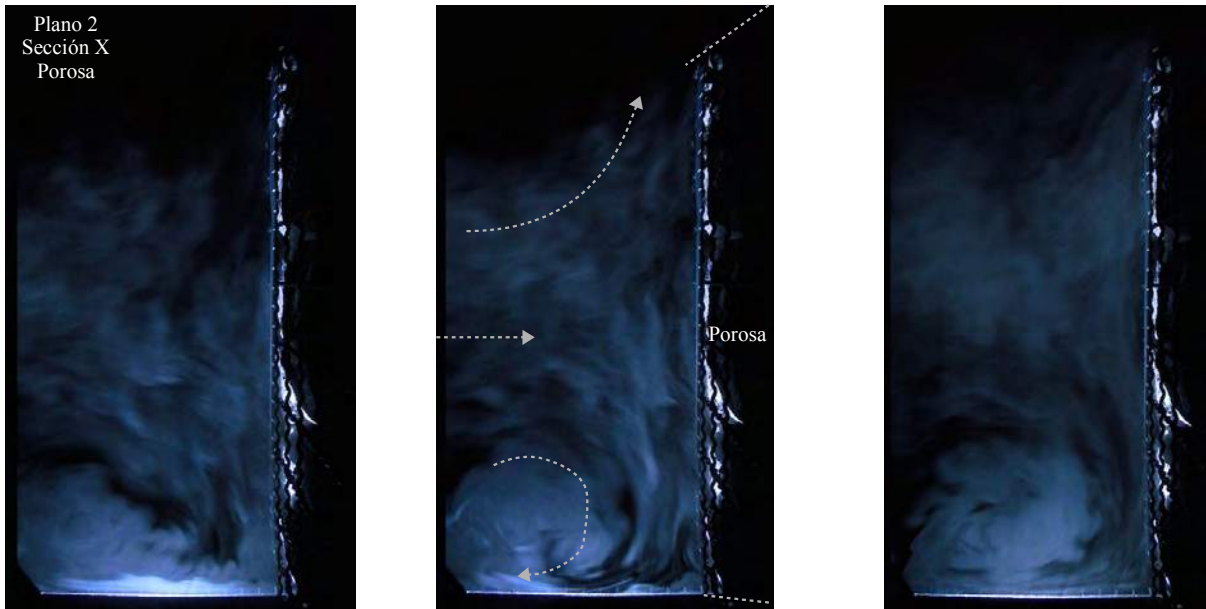


Figura 9.34: Secuencia de izquierda a derecha de la trayectoria del flujo para el plano indicado. Se observa igualmente la existencia de una zona de recirculación en la base de la muestra, la diferencia más notoria es la penetración del flujo a través de la malla que contiene las rocas del gavión. Visualización realizada a 2.5 Hz y 17% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

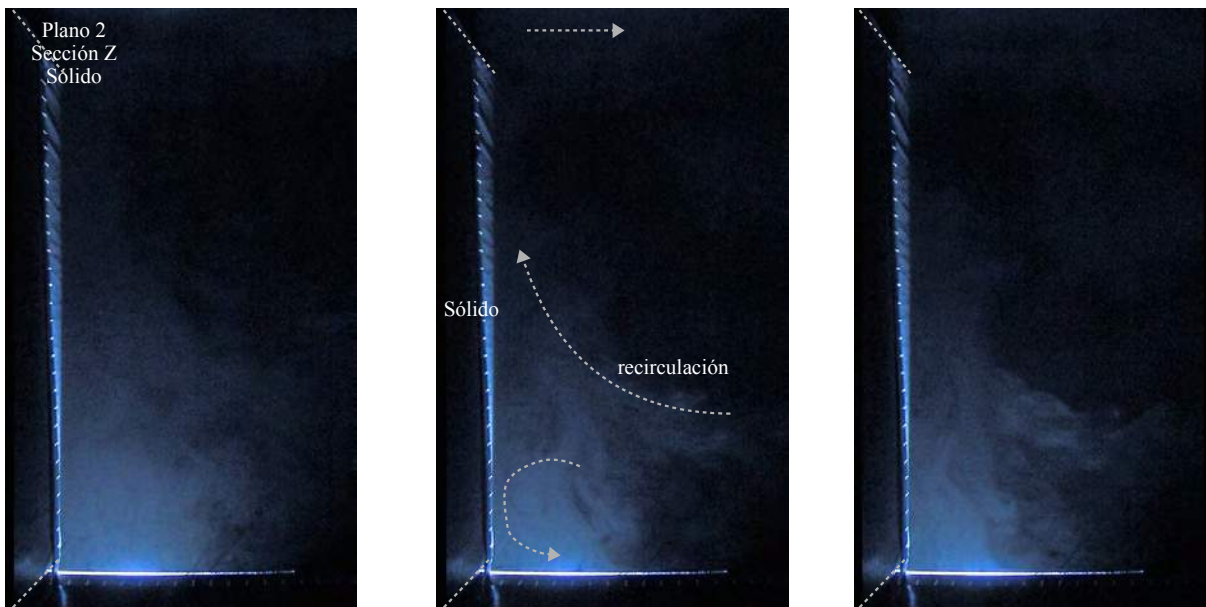


Figura 9.35: Secuencia de izquierda a derecha de la trayectoria del flujo para el plano indicado. Se observa que al superar la muestra el flujo ha cambiado de dirección y forma una zona de recirculación. En la base de la muestra, se forma en ocasiones un vórtice en sentido contrario al flujo anterior. El viento que pasa por encima de la muestra, continúa con esta trayectoria, en general se observa como un flujo inestable difícil de predecir. Visualización realizada a 2.7 Hz y 6% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

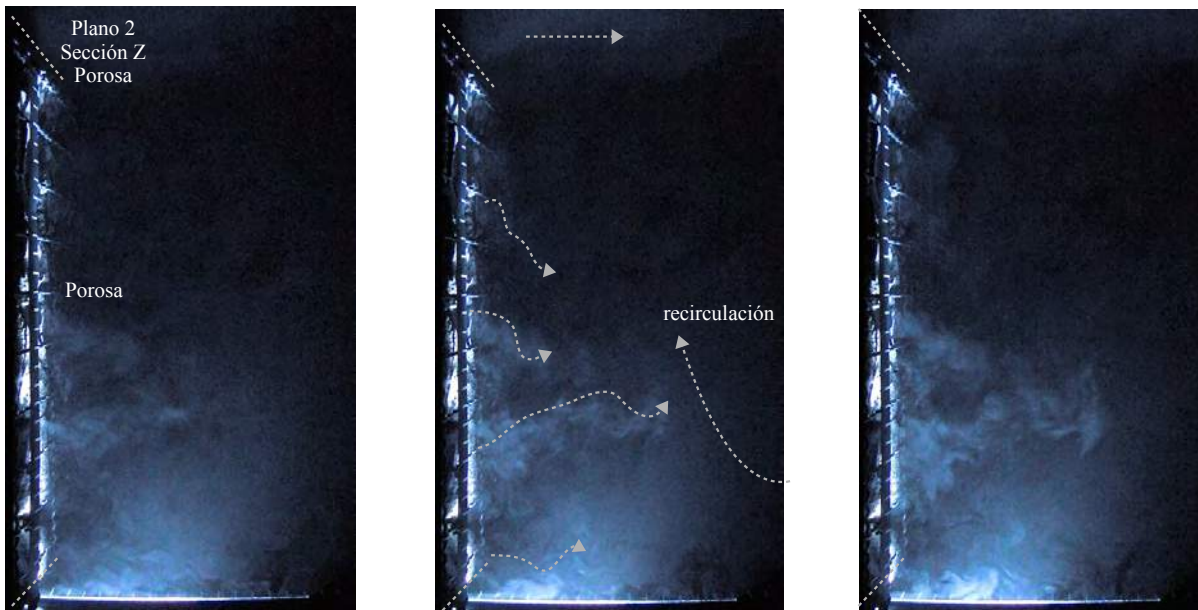


Figura 9.36: Secuencia de izquierda a derecha de la trayectoria del flujo para el plano indicado. En comparación al comportamiento del viento con la muestra sólida, en este caso se presenta flujo de viento a través del gavión, modificando la zona de recirculación; Con la información contenida en las visualizaciones no es posible afirmar si esta última zona mencionada se ve reducida en longitud o simplemente desplazada. Visualización realizada a 2.7 Hz y 6% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

Los planos laterales 1 y 3 mantienen características similares entre si y no se observan notables diferencias entre la muestra sólida y la porosa.

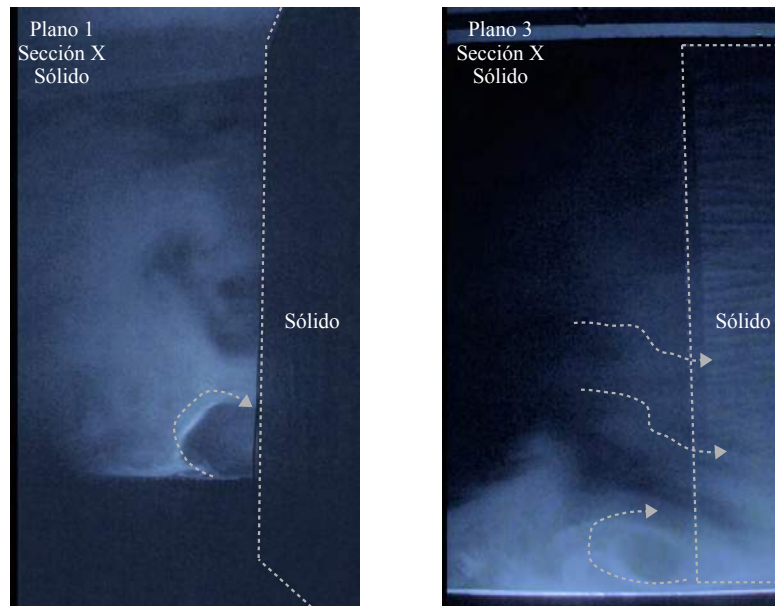


Figura 9.37: Visualizaciones de la trayectoria del flujo en los planos laterales 1 y 3, ambos en su sección X. Se mantiene el área de recirculación en la base para los planos laterales, en el plano 3 se alcanza a observar en la parte media y superior el desplazamiento lateral del flujo hasta rebasar la muestra. Visualizaciones realizadas a 2.5 Hz y 17% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

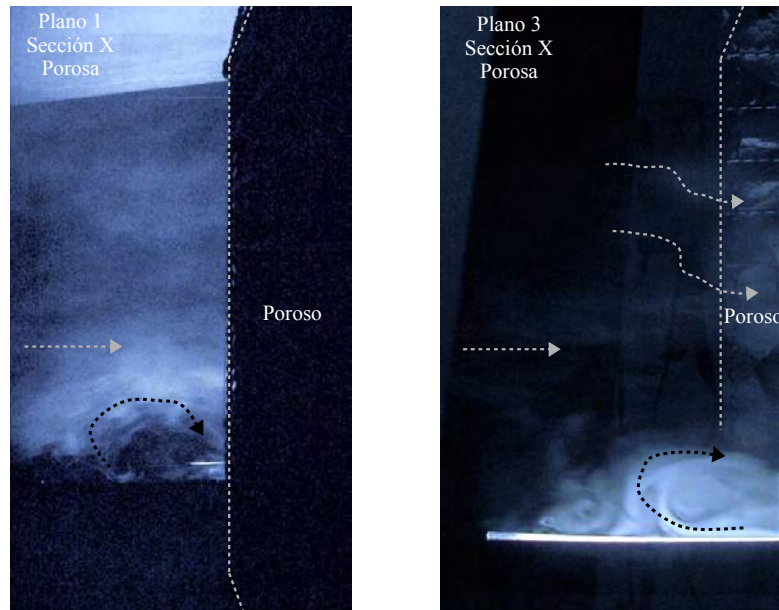


Figura 9.38: Visualizaciones de la trayectoria del flujo en los planos laterales 1 y 3, ambos en su sección X. Comparando con los mismos planos de la muestra sólida el área de recirculación en la base se mantiene lo mismo que el desplazamiento lateral del flujo hasta rebasar la muestra. Visualizaciones realizadas a 2.5 Hz y 17% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

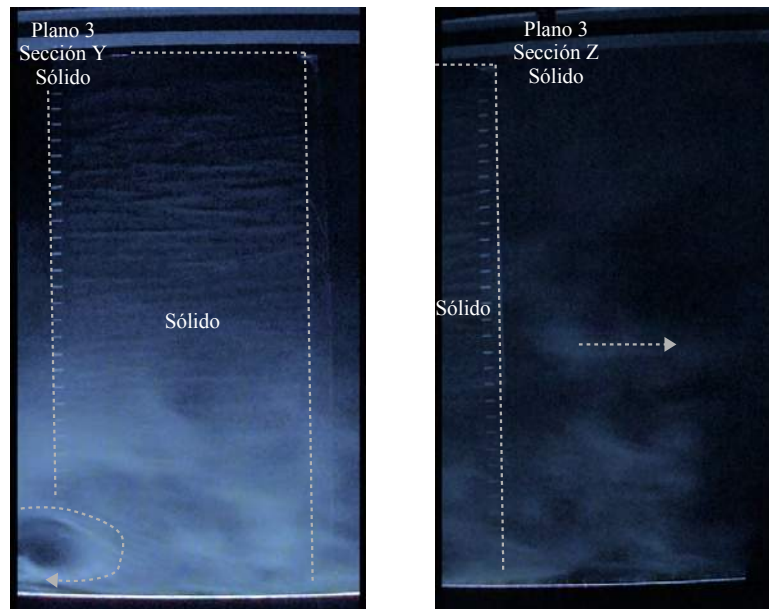


Figura 9.39: Visualizaciones de la trayectoria del flujo para el plano 3, en la sección "Y" y "Z" respectivamente. Para la sección "Y" se alcanza a observar el vórtice en la base, mientras que para la siguiente sección el flujo continua con su trayectoria sin alteraciones. Visualizaciones realizadas a 2.5 Hz y 17% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

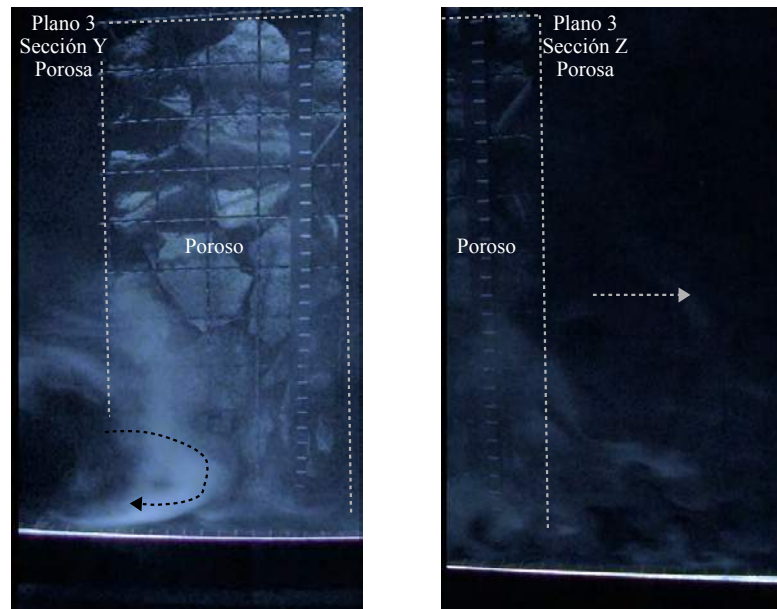


Figura 9.40: Visualizaciones de la trayectoria del flujo para el plano 3, en la sección “Y” y “Z” respectivamente. Se observa un comportamiento similar del flujo con la muestra sólida. Visualizaciones realizadas a 2.5 Hz y 17% de porcentaje de humo. (Elaboración propia)

El comportamiento del flujo es en general el esperado para la interacción del viento con objetos como un muro o incluso un edificio. Sin embargo la trayectoria del viento más relevante de las observadas en las visualizaciones anteriores es la correspondiente a la muestra porosa en el plano central, particularmente al atravesar la muestra (Figura 9.36). Donde se observa la función de ventilación del gavión, se comporta como una barrera permeable de ahí que logre modificar el área de recirculación al rebasar la muestra.

Discusión sobre el análisis de Ventilación: velocidad – volumen – dirección.

En los datos obtenidos durante el análisis de velocidad del flujo se desprende que la envolvente porosa permite entre un 13% y un 17% mayor velocidad al centro de la muestra en comparación con la opción sólida. Este efecto se ve reforzado al observar que la aceleración del viento es menor alrededor de la muestra porosa y mayor en la sólida (Figura 9.27). De ahí que se mencione que la opción porosa distribuye la energía del viento de forma más uniforme, mientras que el sólido no tiene más opción que enviar esa energía a su alrededor.

En la estimación del volumen de aire que atraviesa la muestra puede decirse primero que es posible encadenar los resultados obtenidos en otras de las pruebas experimentales, como son los datos de la evaluación de porosidad y los de velocidad, para ampliar la información sobre el desempeño de la muestra de estudio.

Segundo, que la cantidad de aire que atraviesa la superficie porosa es del 23% de la que atravesaría la misma superficie (0.60X0.60m) si fuera una abertura completamente abierta, por lo que puede sostenerse que el sistema gavión es capaz de cumplir con la función de ventilar, al menos en uno de sus objetivos que es renovar el aire interior. Esta última afirmación se complementa con las visualizaciones de la trayectoria del viento, donde puede observarse de manera clara el paso del flujo a través de muestra.

Por otro lado los resultados obtenidos en el análisis de ventilación son limitados, debido a que no se puede sostener que se ha caracterizado una envolvente con base en gaviones en cuanto a la ventilación. Para esto sería necesario incluir otras pruebas, en particular la medición de la tasa de ventilación para una envolvente en un espacio real, con dimensiones representativas de una área habitable y al menos contar con las mediciones de un año entero.

Otra limitante a los resultados obtenidos está relacionada al equipo donde se realizaron las pruebas, ya que el túnel de viento utilizado está diseñado para caracterizar el flujo en muestras mucho más pequeñas, similares a los modelos arquitectónicos a escala. Por lo que una obstrucción de 0.60X0.60m provoca una aceleración del viento que puede confundir los resultados.

Una opción para poder estimar lo anterior sería repetir las pruebas para una muestra de gavión más pequeña, por ejemplo 0.30X0.30m, aunque es discutible si una pieza de estas dimensiones es representativa de una envolvente. Otra posibilidad es generar un gavión a escala, utilizando grava del mismo material, para esto sería necesario realizar pruebas de porosidad para la muestra a escala hasta igualar con la muestra de tamaño real calibrando el tamaño del agregado.

Otra opción es construir un cubo de pruebas al exterior, donde dos de sus caras o al menos una de ellas se compongan de gaviones y el resto sean herméticas al paso del viento para poder medir la velocidad del viento al exterior e interior del cubo. Sin embargo el volumen de aire interior y la superficie exterior expuesta al paso del viento serán igualmente limitadas, por lo que la prueba en un espacio real, siempre dará los resultados más certeros.

Una evaluación a través de una simulación numérica permitiría complementar los resultados obtenidos de manera experimental y realizar un cruce de los mecanismos físicos tanto de ventilación como de inercia térmica, utilizando software especializado como ANSYS Fluent, TRNSYS o COMSOL entre otros. Por lo que la búsqueda de la asesoría adecuada en las primeras etapas de la investigación y que permita vincular los tópicos propios de la arquitectura con otras disciplinas es fundamental para desarrollar investigaciones de mayor alcance.

9.4.- Análisis térmico – Basalto, Gavión, Gavión + Ventilación.

El objetivo de la evaluación térmica es determinar el retardo térmico de la envolvente propuesta, para esto es necesario conocer la conductividad, densidad y calor específico, para lo que se realizaron las siguientes evaluaciones experimentales.

Para el análisis térmico se consideró realizar tres evaluaciones complementarias; la 1a para el material base (basalto), la 2a para el sistema completo (gavión) y por último el sistema completo con ventilación forzada. Para las dos últimas evaluaciones, se utilizó un medidor de flujo de calor de gran formato (Terres Martínez, 2015). Para la primera fue necesario reproducir un medidor de flujo térmico de menores dimensiones y generar tres muestras de estudio.

9.41.- 1er análisis, material base (basalto).

Metodología:

(Metodología y asesoría del Mtro. Guillermo Terres Martínez y del Mtro. Manuel D. Gordon Sánchez).

- I. Reproducir el medidor de flujo de calor de placa caliente en formato pequeño (20X20cm). (Ver Anexo 1)
- II. Calibración del equipo. (Ver Anexo 1)
- III. Generar muestras del material base. (Ver Anexo 1)
- IV. Determinar las principales características termofísicas de la muestras.

Material y equipo empleado.

- a) Medidor de flujo de calor de placa caliente en formato pequeño.
- b) 5 Termopares tipo K.
- c) Adquisidor de datos - Módulo Adam 4018.
- d) Software LabVIEW como adquisidor de datos.

IV. Determinar las principales características termofísicas de las muestras.

Se realizaron 5 pruebas con la técnica definida durante la calibración del equipo (Ver Anexo 1). El concepto general de la prueba consiste en medir el flujo de calor unidireccional a través del material muestra al cual se quiere conocer su conductividad térmica. Este se coloca entre dos platos paralelos (placa caliente – placa fría) a temperaturas constantes pero diferentes para forzar el flujo térmico (Terres Martínez, 2015).

De las tres muestras de material base generadas (Ver Anexo 1) solo se utilizaron dos para la medición de conductividad y conductancia debido a que la tercera muestra no asentaba completamente sobre el equipo, permitiendo que existiera una pequeña cantidad de aire, lo que provocaría resultados inciertos.

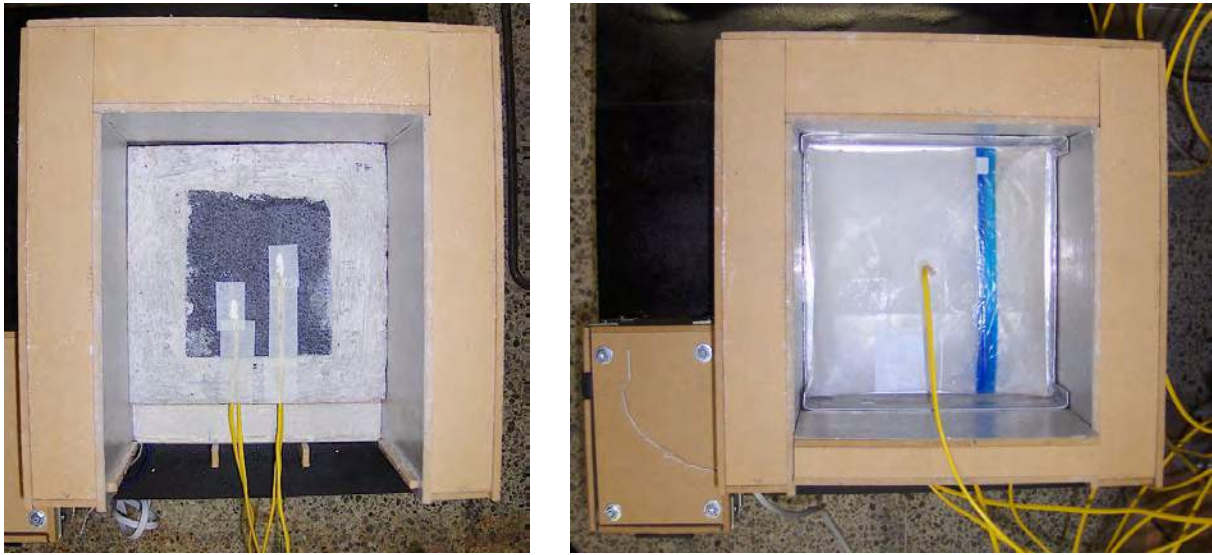


Figura 9.41: Izquierda, muestra de basalto con termopares dentro del conductímetro de formato pequeño (Ver Anexo 1). Derecha, placa fría con termopar durante evaluación del comportamiento térmico. (Elaboración propia)

De las 5 pruebas aquí reportadas, 4 se realizaron con la muestra 2 (P5, P6, P7, y P8). La 5a prueba con la muestra 1 (P9.M1), debido a que esta última se utilizó durante la calibración (Ver Anexo 1). El promedio y variación presentados a continuación no incluyen en ningún caso la prueba P9.M1, solo se incluye con carácter informativo.

A continuación se presenta la prueba P6 como ejemplo de las pruebas realizadas a una muestra de basalto (ver en Anexo 3 formato de resultados desglosados de cada prueba). Para el cálculo de la conductividad térmica λ y la conductancia C , se utilizaron las siguientes ecuaciones, derivadas de la ley de Fourier.

$$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \qquad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$$

Ecuación 9.7 y 9.8 para estimar la conductividad térmica λ (W/m° C) y la conductancia térmica C (W/m² °C) respectivamente.

Donde:

SIMBOLO	=	DEFINICIÓN	UNIDADES
λ	=	conductividad térmica	W/(m° C)
C	=	conductancia térmica	W/(m ² ° C)
P	=	potencia de la resistencia	W
A	=	área de medición	m ²
L	=	separación entre placas	m
ΔT	=	diferencial de temperatura	°C

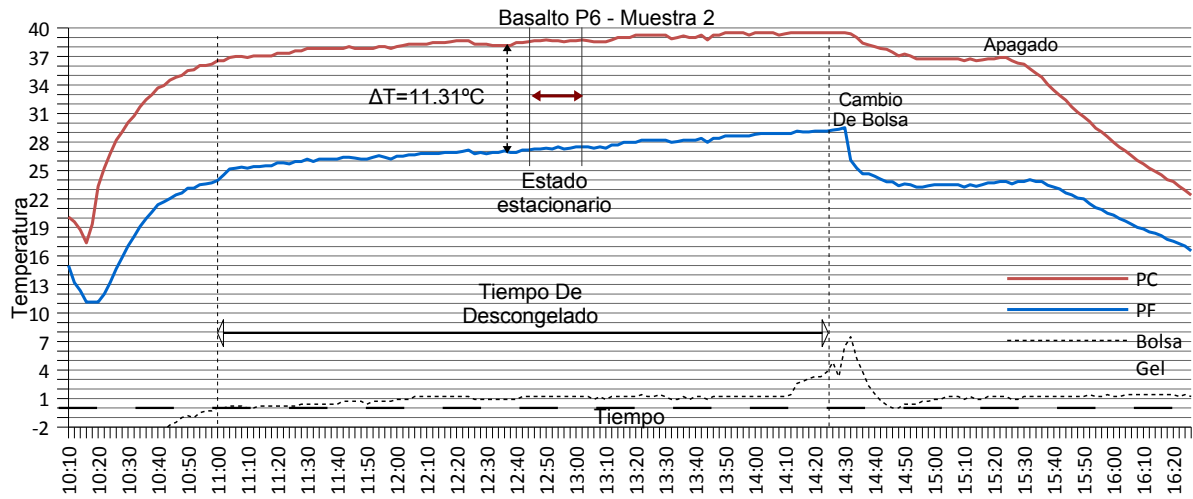


Figura 9.42: Gráfica ejemplo del comportamiento térmico para la muestra 2 de basalto. (Elaboración propia)

TEMPERATURA % CARAS		
HORA	CALIENTE	FRÍA
12:44	38.55	27.15
12:46	38.65	27.25
12:48	38.65	27.25
12:50	38.75	27.35
12:52	38.65	27.25
12:54	38.65	27.50
12:56	38.55	27.25
12:58	38.65	27.35
13:00	38.65	27.50
13:02	38.75	27.50
Δ_t	0.2	0.35
PROMEDIOS	38.65	27.34
Δ_t	11.315	

DATOS DE ENTRADA		
P	=	75.33 W
A	=	0.04 m ²
L	=	0.0130 m
TEMPERATURAS		
PC	=	38.65 °C
PF	=	27.34 °C
ΔT	=	11.32 °C
RESULTADOS		
λ	=	2.164 W/(m°C)
C	=	166.44 W/(m ² °C)

Tabla 9.21: Datos obtenidos durante la prueba P6 para el cálculo de conductividad y conductancia térmica. El Area de medición A, es de 0.20X0.20m, La separación entre placas L, es el espesor de la muestra (0.21m) menos dos ranuras para termopares de 0.004m c/u. Ver la medición de la potencia en Anexo 1. (Elaboración propia)

BASALTO MUESTRA 2 – TECNICA 2									
MUESTRA 2	RESULTADOS	P5	P6	P7	P8	P9.M1	Promedios	Unidades	Variación
W	1.735	C	172.222	166.438	167.029	166.291	153.609	167.995	W/(m ² °C)
SIN TAPA, UNA SOLA BOLSA DE GEL Y UN CAMBIO	λ	2.239	2.164	2.171	2.162	1.997	2.184	W/(m°C)	3.44%
	ΔT	10.935	11.315	11.275	11.325	12.260	11.213	°C	3.44%
	Características	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C			

Tabla 9.22: Resultados de 5 pruebas sobre C=conductancia, λ =conductividad térmica, ΔT =diferencia de temperatura entre caras, realizadas a 2 muestras de basalto, ver en Anexo 3 formatos desglosados de cada prueba. (Elaboración propia).

Para la muestra 2 de basalto, se obtuvo un valor de λ promedio de 2.184 W/m°C y una conductancia de 167.995 W/m²°C, mientras que para la muestra 1 se obtuvo un valor de λ de 1.997 W/m°C y una conductancia de 153.609 W/m²°C.

Los datos de conductividad, reportados en distintas bibliografías para el basalto, presentan importantes variaciones. En general se observa este comportamiento para un amplio número de rocas, debido a características locales de cada muestra. Las propiedades termofísicas de las rocas dependen principalmente de su composición mineral, del tamaño y forma de esos minerales, de la presencia de porosidad y si los poros contienen gases o líquidos (Ozkahraman, Selver e Isik, 2004).

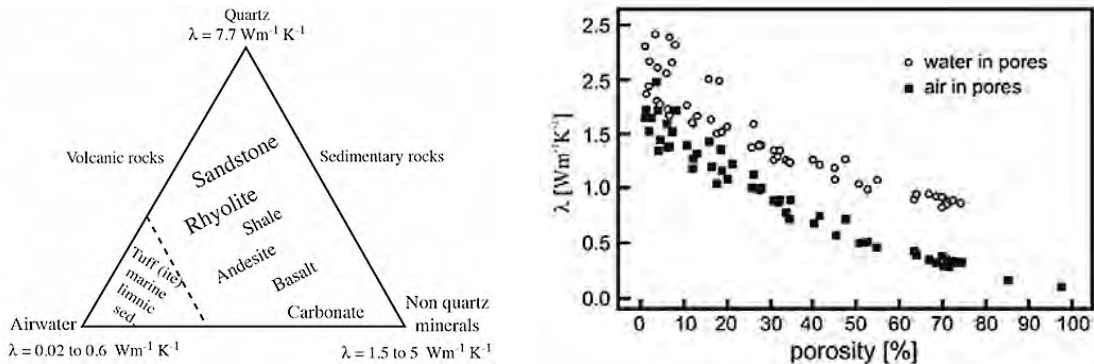


Figura 9.43: Izquierda, diagrama ternario de los factores que más afectan las propiedades termofísicas de las rocas volcánicas y sedimentarias (Ozkahraman, Selver e Isik, 2004). Se observa que el basalto se ubica cerca de valores de λ entre 1.5 y 5 W/m°C. Derecha, variación de la conductividad térmica en función de la porosidad si contiene aire o agua (Siegesmund y Dürrast, 2014). Ver tabla 9.10 % de absorción de la muestra de estudio.

Propiedades térmicas del basalto según distintas fuentes				
Roca	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg °C)	λ (W/m°C)	Fuente
Basalto	2,040 – 3,200		0.51 – 2.03	3
		840.00	1.69 – 2.11	4
	2,800.00	837.35	2.09	7
	2,600.00		2.5	1
	2,500 – 2,700		2.8	6
	2,880.00	840.00	3.49	2
	2,875.00	840.00	3.5	5
No.	Fuente			
1	NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios			
2	Design Builder, Version 3.0.0.105			
3	S. Siegesmund y H. Dürrast. (2014). Physical and Mechanical Properties of Rocks.			
4	L. Eppelbaum, I. Kutasov, A. Pilchin., (2014). Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids.			
5	Características térmicas de materiales – Universidad de Sonora			
6	APROY-NMX-C-460-ONNCCE-2007, Anteproyecto de norma mexicana, Aislamiento en vivienda			
7	Gupta P. Ravi. (2010). Remote Sensing Geology, Springer – Verlag, Berlin, 656p			

Tabla 9.23: Propiedades térmicas del basalto reportadas en distintas bibliografías. (Elaboración Propia)

Como se observa en la tabla anterior el valor de λ , varía desde el 0.51 hasta el 3.5 W/m°C. La densidad desde el 2,040 hasta los 3,200 kg/m³. El valor de conductividad térmica (λ) obtenido aquí de 2.184 W/m°C se encuentra entre el reportado por la fuente número 7 y la 1. Ante un rango tan amplio en los datos, se hace evidente la necesidad de generar una base de datos de materiales locales, ya que la mayoría de las fuentes aquí citadas son extranjeras o reportan datos tomados de fuentes extranjeras, excepto la NOM-008-ENER-2001.

i) Evaluación del calor específico.

Como evaluación complementaria se incluyó la medición del calor específico de la muestra, utilizando el conductímetro de formato pequeño, con modificaciones en la técnica. Ya que para la evaluación de conductividad térmica el objetivo es medir el flujo de calor que atraviesa la muestra, la técnica seleccionada consistía en no obstruir dicho flujo. Mientras que para obtener el calor específico el objetivo es saturar la muestra de calor hasta incrementar la temperatura de la misma. Por lo que la técnica utilizada consistió en retirar la placa fría y todos sus componentes y únicamente colocar una tapa aislante a base de dos capas de fibra cerámica para después encender el equipo a 50°C.

$$Cp = \frac{\Delta t \times P}{M \times (T_o - (T_o - 1))}$$

Ecuación 9.9: Para estimar la calor específico Cp (J/kg °C).

Donde:

		SIMBOLO	
		Cp	Calor específico
Δt	1.000 seg	Δt	Intervalo de medición
P	75.330 J/seg	P	potencia del equipo
M	1.735 kg	M	masa de la muestra
		To	temp en un tiempo
		To-1	temp en un tiempo ant.

Encendido	9:20:00	
Δtemp	HORA	Cp
0.150	9:21:09	289.45
0.125	9:21:57	347.34
0.075	9:22:10	578.90
0.050	9:22:21	868.36
0.125	9:23:01	347.34
0.175	9:30:11	248.10
0.075	9:30:55	578.90
0.025	9:35:09	1,736.71
Apagado	12:20:00	

MODA

Tabla 9.24: Tabla de resultados obtenidos durante la medición del calor específico. Como se observa en la tabla derecha y en la gráfica siguiente, se obtienen distintos valores de Cp, dependiendo de la diferencia de temperatura en un segundo, diferencia medida para un tiempo (To) menos la temperatura un segundo antes (To-1). El criterio para definir el valor fue utilizar el valor de Δtemp que más se repite (moda) a lo largo de toda la prueba que es de 0.05K y un Cp de 868.36 J/kg °C muy cercano al reportado en distintas bibliografías.

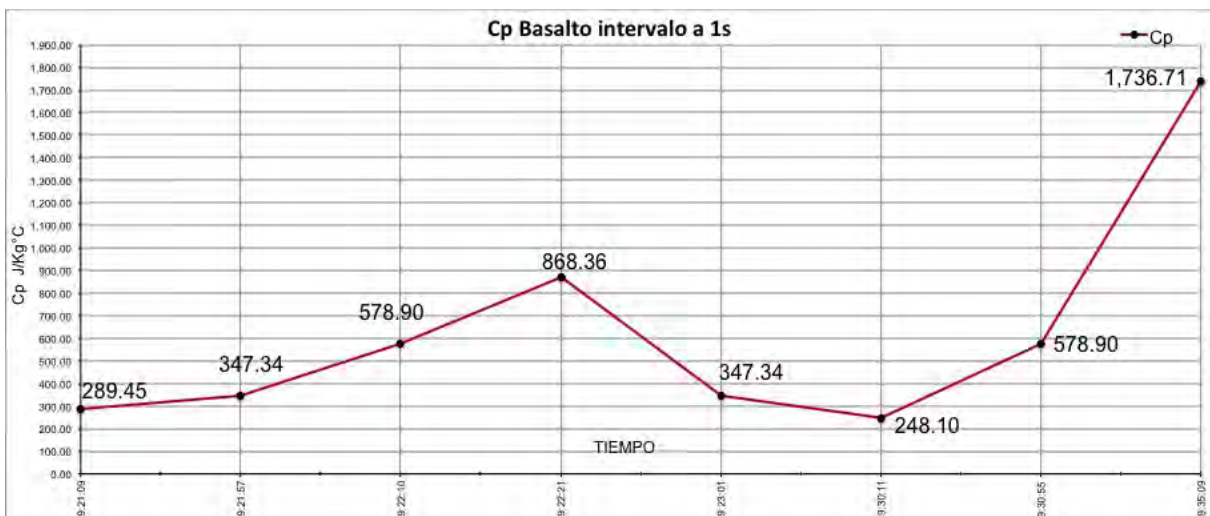


Figura 9.44: Gráfica de calor específico en el tiempo para la muestra 2 de basalto. Se observa el valor seleccionado de 868.36 J/kg °C que se presenta a los dos minutos y veintidós segundos de encendido. (Elaboración propia)

9.42.- 2do análisis, Gavión.

Metodología:

(Metodología y asesoría del Mtro. Guillermo Terres Martínez y del Mtro. Manuel D. Gordon Sánchez).

- I. Preparación de la muestra de envoltente porosa.
- II. Determinar las principales características termofísicas de las muestras.

Material y equipo empleado.

- a) Muestra de envoltente porosa a partir de un gavión.
- b) Medidor de flujo de calor de placa caliente (Terres Martínez, 2015).
- c) 14 Termopares tipo J.
- d) Adquisidor de datos - Módulo Adam 40-18 y 40-18M.
- e) Software LabVIEW como adquisidor de datos.

- I. Preparación de la muestra de envoltente porosa.

Para colocar correctamente el gavión sobre el equipo y realizar las mediciones de forma más adecuada se consideró eliminar la rejilla metálica que contiene la muestra, ya que al entrar en contacto directo tanto con la placa caliente como con la placa fría esto crearía un puente térmico que impediría el flujo de calor a través del sistema constructivo. Así se decidió llenar el conductímetro con una capa homogénea de 0.30 cm. de espesor de rocas en toda el área de la placa caliente.

Para los puntos de medición donde se ubican los termopares se seleccionaron 14 rocas para ubicar 7 sobre la placa caliente y 7 sobre la placa fría. Para esto se escogieron las muestras de mayor tamaño posible y que tuvieran una cara relativamente plana para que asentara de la mejor manera sobre la placa caliente y fría respectivamente, para después ranurar el espacio donde se ubicará el sensor.



Figura 9.45: Izquierda, muestra de basalto con ranura para termopar. Derecha, 14 muestras de basalto para puntos de medición. (Elaboración propia)

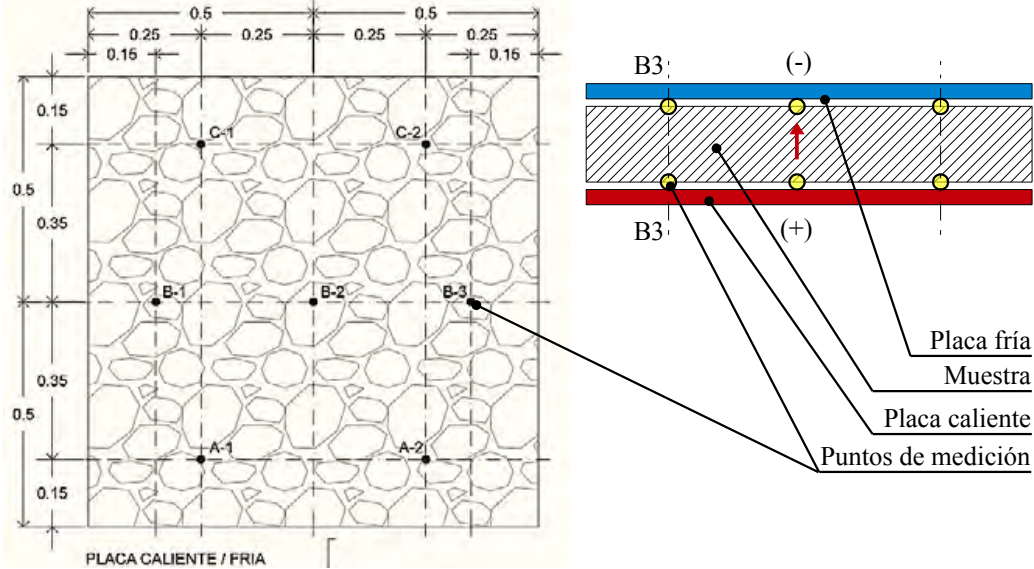


Figura 9.46: Izquierda, ubicación de los 7 puntos de medición sobre la placa caliente o fría respectivamente. Derecha, diagrama conceptual de puntos de medición dentro del equipo. (Elaboración propia)

Los puntos de medición sobre la placa caliente deben coincidir con los ubicados en la placa fría para obtener una medición perpendicular del flujo de calor. Por lo que para asegurar que estuvieran verticalmente alineados se preparó un bastidor de madera a fijar sobre el conductímetro, donde en sus intersecciones se colocó un apuntador láser que permitiera observar con claridad la ubicación de cada punto tanto en la parte inferior como en la superior de la muestra.

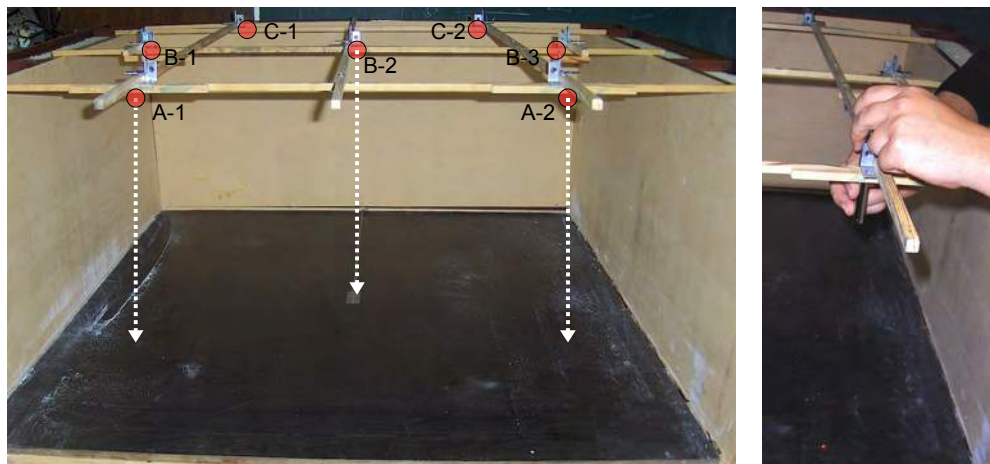


Figura 9.47: Bastidor y apuntador láser para alineación de los 7 puntos de medición. (Elaboración propia)

Después de colocar las muestras que contienen los termopares sobre la placa caliente y teniendo cuidado de que mantengan la ubicación de los puntos se procedió a llenar el equipo.

El criterio para el llenado es el mismo que se utilizó durante la evaluación de porosidad de la muestra, es decir se procuró que en el espesor de 0.30 m contuviera el mayor número de rocas posible, consiguiendo la muestra más compacta posible. Para esto se combinaron muestras de mayor tamaño (0.20 m) con muestras de menor tamaño (0.10 m).



Figura 9.48: Arriba, llenado de gavión dentro del conductímetro desde los termopares ubicados en la placa caliente. Abajo, verificación de la ubicación de los termopares y llenado de la capa final junto con los termopares superiores. (Elaboración propia)



Figura 9.49: Izquierda, colocación de la placa fría compuesta por la bandeja de aluminio y la doble capa de bolsas de gel congelado. Derecha, vista general del conductímetro con la tapa superior a base de poliestireno, se observan los apoyos perimetrales a base de barrotes de madera para asegurar la integridad del equipo expuesto a más de 300kg de peso. (Elaboración propia)

II. Determinar las principales características termofísicas de la muestra.

Se realizaron 5 pruebas en total, 4 de ellas con la tapa superior de poliestireno y la 5a sin ella. Para la 5a prueba (P5-ST) se realizó este ajuste, dado que se realizaron en paralelo las pruebas del material base (basalto) en el conductímetro de formato pequeño, donde se observó que al retirar la tapa se obtiene mejor repetibilidad entre pruebas y un aumento en Δt . Sin embargo para el equipo de formato grande este ajuste no produjo cambios apreciables.

A continuación se presenta la prueba P4 como ejemplo de las pruebas realizadas al sistema Gavión (ver en Anexo 4 formato de resultados desglosados de cada prueba). En todas las pruebas el equipo se configuró a 60°C, sin embargo la prueba P3 se modificó la temperatura a 50°C para poder hacer una comparación directa con las pruebas de basalto en formato pequeño que se realizaron igualmente a 50°C.

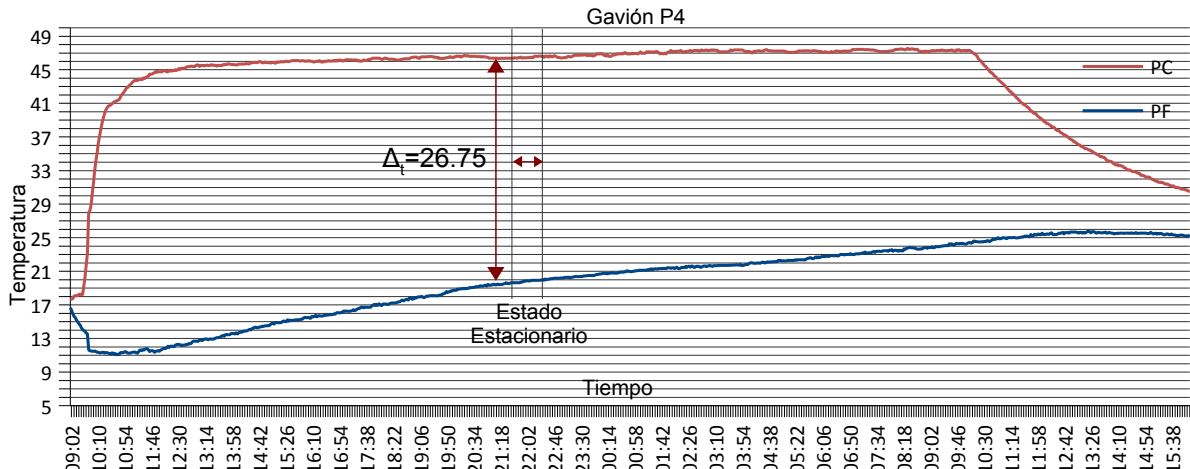


Figura 9.50: Gráfica ejemplo del comportamiento térmico de un gavión, duración de encendido y apagado 24 h a 60°C. Nótese que el calentamiento del sistema al encender el equipo es en corto tiempo mientras que el enfriamiento se da con una pendiente menos pronunciada. (Elaboración propia)

TEMPERATURA % CARAS		
HORA	CALIENTE	FRÍA
21:34	46.37	19.63
21:36	46.37	19.63
21:38	46.37	19.63
21:40	46.43	19.66
21:42	46.40	19.66
21:44	46.37	19.66
21:46	46.46	19.66
21:48	46.43	19.66
21:50	46.50	19.69
21:52	46.37	19.69
Δ_t	0.13	0.06
PROMEDIOS	46.41	19.65
Δ_t	26.75	

DATOS DE ENTRADA			
P	=		194.51 W
A	=		1.00 m ²
L	=		0.3100 m
TEMPERATURAS			
PC	=		46.41 °C
PF	=		19.65 °C
ΔT	=		26.75 °C
RESULTADOS			
λ	=		2.254 W/(m°C)
C	=		7.27 W/(m ² °C)

Tabla 9.25: Datos obtenidos durante la prueba P4 para el cálculo de conductividad y conductancia térmica. El Area de medición A, es de 1X1m, La separación entre placas L, es el espesor de la muestra (0.31m) no se descontaron las ranuras para termopares y se consideró 1 cm extra del espesor de 0.30 ya que las caras del gavión no son planos perfectos, la potencia del equipo es de 194.51 W (Terres Martinez, 2015). (Elaboración propia)

Utilizando las siguientes ecuaciones, se obtuvieron los resultados para las 5 pruebas realizadas a la muestra de gavión.

$$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \qquad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$$

Ecuación 9.7 y 9.8 para estimar la conductividad térmica λ (W/m° C) y la conductancia térmica C (W/m² °C) respectivamente.

GAVION									Variación	
MUESTRA 2	RESULTADOS	P1	P2	P3	P4	P5-ST	Promedios	Unidades		
W	368.90	C	7.284	7.240	8.645	7.271	7.261	7.264	W/m ² °C	
CON TAPA, DOBLE BOLSA DE GEL, SIN CAMBIO		λ	2.258	2.245	2.680	2.254	2.251	2.252	W/(m°C)	0.60%
		ΔT	26.703	26.864	22.499	26.753	26.789	26.777	°C	0.60%
		Características	18h – 60°C	24h – 60°C	24h – 50°C	24h – 60°C	24h – 60°C			

Tabla 9.26: Resultados de 5 pruebas sobre C=conductancia, λ =conductividad térmica, ΔT =diferencia de temperatura entre caras, realizadas a una muestra de gavión, ver en Anexo 4 formatos desglosados de cada prueba. (Elaboración propia).

Como se observa en la tabla anterior, los resultados obtenidos para la prueba realizada sin tapa (P5-ST) no presentó ningún cambio apreciable. La variación entre cada una de las pruebas fue menor al 1%, lo que muestra una buena repetibilidad de los datos.

El promedio de λ aquí reportado (2.252 W/m°C) no incluye la prueba P3, ni la variación (0.60%) ya que se realizó a una temperatura menor para poderla comparar directamente con la pruebas realizadas al basalto también a 50°C. Se observa que al realizar la prueba a una temperatura menor, el valor de ΔT disminuye, por lo que se obtiene un valor mayor de λ .

9.43.- 3er análisis, Gavión + Ventilación Forzada.

Metodología:

(Metodología y asesoría del Mtro. Guillermo Terres Martínez y del Mtro. Manuel D. Gordon Sánchez).

- I. Preparación de la muestra de envolvente porosa.
- II. Caracterización de los ventiladores a utilizar.
- III. Determinar las principales características termofísicas de la muestra.

Material y equipo empleado.

- a) Muestra de envolvente porosa a partir de un gavión.
- b) Medidor de flujo de calor de placa caliente (Terres Martínez, 2015).
- c) 14 Termopares tipo J.
- d) Adquisidor de datos - Módulo Adam 40-18 y 40-18M.
- e) Software LabVIEW como adquisidor de datos.
- f) Dos ventiladores de uso comercial.

I. Preparación de la muestra de envolvente porosa.

Para incluir en la evaluación térmica el flujo de viento a través de la envolvente muestra, se colocó un bastidor de madera entre la placa caliente y la muestra de estudio, con el objeto de generar un espacio suficiente donde se generará una ventilación forzada por medio de dos ventiladores. El bastidor se construyó en madera debido a su baja conductividad y se generó una área libre de 5 cm a partir de la placa caliente para el paso del viento.

Debido al peso superior a los 350 kilos de la muestra de 1 X 1 X 0.30m fue necesario realizar una prueba de carga para asegurar que el bastidor soportara el peso. Para esto se colocaron sobre el cuadrante central formado por las columnas y las traveses un espesor de 0.30m de rocas tipo basalto, considerando el criterio de llenado anteriormente citado, tratando de crear el gavión más denso posible acomodando el mayor número de rocas posible.



Figura 9.51: Bastidor para evaluación térmica durante la prueba de carga, misma que se llevó a cabo durante 24hr. El espacio libre entre los travesaños es aproximadamente de 10cm en su menor dimensión. (Elaboración propia).

Por otro lado la placa fría también se modificó buscando que permitiera el paso del flujo inyectado en la parte baja, para esto se colocaron las bolsas de gel refrigerante sobre una malla metálica, creando así una especie de placa fría porosa.

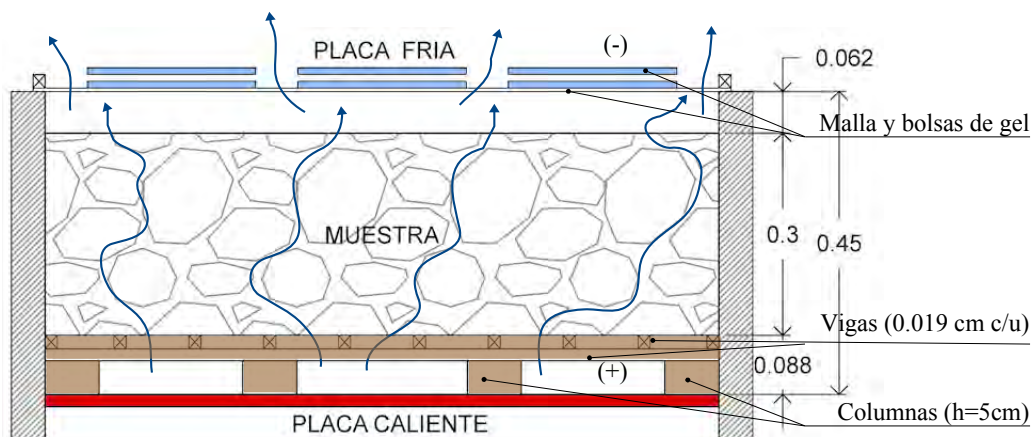


Figura 9.52: Diagrama de evaluación térmica con flujo de viento incluido. (Elaboración propia).



Figura 9.53: Arriba, muestras de basalto con termopares sobre bastidor. Abajo, llenado final, colocación de placa fría porosa y de la compuerta dejando libres 5 cm como entrada de aire. (Elaboración propia).

II. Caracterización de los ventiladores a utilizar.

Antes de realizar la prueba se caracterizaron los ventiladores designados para definir la velocidad de viento a la cual se someterá la muestra. Para esto se utilizó un *data logger* portátil y un anemómetro de hilo caliente. La medición se realizó para cada ventilador por separado esperando una operación similar de ambos. Y una medición de los dos ventiladores en conjunto, ambas mediciones a una distancia de 0.50m y 1.00m colocando el anemómetro al centro de cada ventilador.

Los resultados indican que los ventiladores trabajan a una velocidad similar por lo que es recomendable utilizarlos en conjunto, por otro lado que la distancia más apropiada para colocarlos es a 1m ya que a menor distancia se observa que hay una área entre ambos equipos donde todavía no se mezclan los flujos de viento de c/u.

	Ventilador 1		Ventilador 2		Ventilador 1 + 2	
Distancia m	0.50	1.00	0.50	1.00	0.50	1.00
Q (lts/s)	28.00	15.00	30.00	12.00	3.00	12.00
V (m/s)	3.00	1.40	2.70	1.20	0.50	1.20

Tabla 9.27: Caracterización de ventiladores, donde "Q" es el caudal de viento generado por el ventilador a la distancia indicada y "V" es la velocidad. Se observa que la velocidad del viento para cada uno de los ventiladores es similar, mientras que la velocidad en conjunto es menor a una distancia de 0.50m probablemente porque el ángulo de apertura del flujo aun no alcanza esa zona. (Elaboración propia).

III. Determinar las principales características termofísicas de la muestra.

Se realizaron 5 pruebas a la muestra de gavión, todas a 60°C. Durante las cuales siempre se encendió y apagó el conductímetro junto con los ventiladores. Estos últimos se colocaron a 1 metro de distancia de la compuerta del conductímetro y centrados a la misma altura donde se ubica la entrada de aire del equipo.



Figura 9.54: Vista general del conductímetro de gran formato durante la prueba de ventilación. Se observa la posición de los ventiladores y la placa fría porosa en la parte superior del equipo. (Elaboración propia).

A continuación se presenta la prueba P8 como ejemplo de las pruebas realizadas al sistema Gavión (ver en Anexo 4).

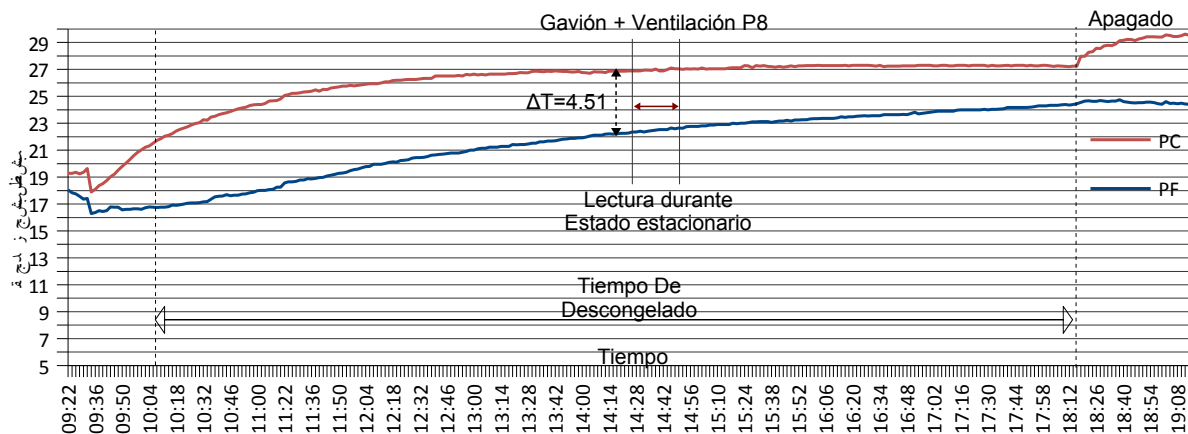


Figura 9.55: Gráfica ejemplo del comportamiento térmico para una muestra de gavión con ventilación forzada, duración de encendido y apagado 9 h a 60°C. La temperatura del viento fue aproximadamente de 20°C, ambiente. (Elaboración propia)

TEMPERATURA % CARAS		
HORA	CALIENTE	FRÍA
14:24	26.90	22.29
14:26	26.90	22.34
14:28	26.90	22.34
14:30	26.90	22.41
14:32	26.94	22.34
14:34	26.94	22.41
14:36	26.93	22.46
14:38	27.03	22.49
14:40	26.90	22.53
14:42	26.90	22.53
Δ_t	0.13	0.24
PROMEDIOS	26.92	22.41
Δ_t	4.51	

DATOS DE ENTRADA		
P	=	194.51 W
A	=	1.00 m ²
L	=	0.31 m
TEMPERATURAS		
PC	=	26.92 °C
PF	=	22.41 °C
ΔT	=	4.51 °C
RESULTADOS		
λ	=	13.370 W/(m °C)
C	=	43.13 W/(m ² °C)

Tabla 9.28: Datos obtenidos durante la prueba P8 para el cálculo de conductividad y conductancia térmica. El Area de medición A, es de 1X1m, La separación entre placas L, es el espesor de la muestra (0.31m) no se descontaron las ranuras para termopares y se consideró 1 cm extra del espesor de 0.30 ya que las caras del gavión no son planos perfectos, la potencia del equipo es de 194.51 W (Terres Martinez, 2015). (Elaboración propia)

GAVION + VENTILACION										Variación
MUESTRA 2	RESULTADOS	P6	P7	P8	P9	P10	Promedios	Unidades		
W	359.90	C	40.839	42.180	43.129	42.390	42.817	42.271	W/m ² °C	
SIN TAPA, DOBLE BOLSA DE GEL, SIN CAMBIO	λ		12.660	13.076	13.370	13.141	13.273	13.104	W/(m°C)	5.31%
	ΔT		4.763	4.611	4.510	4.589	4.543	4.626	°C	5.31%
	Características		6h – 60°C	9h – 60°C	9h – 60°C	9h – 60°C	9h – 60°C			

Tabla 9.29: Resultados de 5 pruebas sobre C=conductancia, λ =conductividad térmica, ΔT =diferencia de temperatura entre caras, para un gavión con ventilación forzada, ver en Anexo 4 formatos desglosados de cada prueba. (Elaboración propia).

Se desprende de la gráfica anterior (Fig. 9.55) que al apagar el conductímetro y los ventiladores la temperatura de la cara expuesta al calor se eleva casi 3°C debido al cese del enfriamiento convectivo del viento. En menor medida se observa este efecto en la cara opuesta que aumenta su temperatura en menos de 1°C.

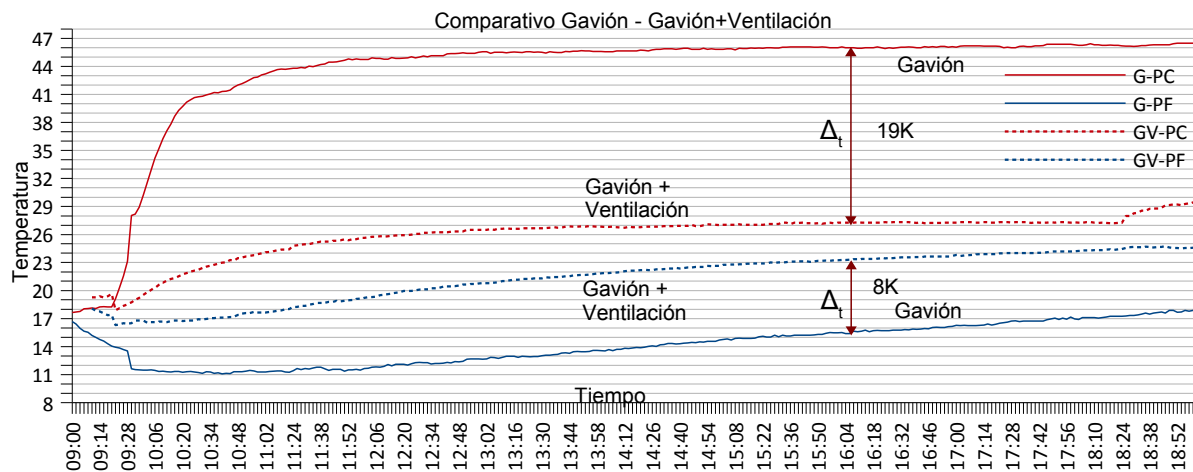


Figura 9.56: Comparativo del ΔT para una evaluación térmica de Gavión y una de Gavión + Ventilación. Se observa que la diferencia de temperatura se ve más afectada en la cara expuesta al calor (Elaboración propia)

En cuanto a la técnica es responsable en parte, de una notable disminución en la ΔT , ya que al estar separada la muestra de la placa caliente o fría el flujo de calor se da por convección y por radiación. El mayor efecto se observa igualmente en la cara expuesta al calor más que en la cara opuesta.

IV. Discusión: Basalto – Gavión – Gavión + Ventilación.

a) Basalto – Gavión.

El valor de conductividad obtenido para el Gavión es mayor que aquel medido para el basalto ($2.184 < 2.252 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), a pesar de que se esperaría que el aire entre las rocas presentará una cualidad aislante, ya que se encuentra relativamente atrapado entre las placas y los muros guarda del conductímetro. Si se compara el valor de λ promedio del basalto con la prueba P3 del gavión, ambas realizadas a 50°C también resulta mayor el del gavión. Esto se atribuye a que el calor atraviesa preferentemente a través de las rocas, ya que encuentra menor resistencia debido a su mayor conductividad (λ del aire = 0.025).

BASALTO MUESTRA 2 – TECNICA 2									
MUESTRA 2	RESULTADOS	P5	P6	P7	P8	P9.M1	Promedios	Unidades	
W	1.735	C	172.222	166.438	167.029	166.291	153.609	167.995	W/m ² °C
SIN TAPA, UNA SOLA BOLSA DE GEL Y UN CAMBIO	λ	2.239	2.164	2.171	2.162	1.997	2.184	W/(m°C)	
	ΔT	10.935	11.315	11.275	11.325	12.260	11.213	°C	
	Características	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C			
GAVION									
MUESTRA 2	RESULTADOS	P1	P2	P3	P4	P5-ST	Promedios	Unidades	
W	368.90	C	7.284	7.240	8.645	7.271	7.261	7.264	W/m ² °C
CON TAPA, DOBLE BOLSA DE GEL, SIN CAMBIO	λ	2.258	2.245	2.680	2.254	2.251	2.252	W/(m°C)	
	ΔT	26.703	26.864	22.499	26.753	26.789	26.777	°C	
	Características	18h – 60°C	24h – 60°C	24h – 50°C	24h – 60°C	24h – 60°C			
GAVION + VENTILACION									
MUESTRA 2	RESULTADOS	P6	P7	P8	P9	P10	Promedios	Unidades	
W	359.90	C	40.839	42.180	43.129	42.390	42.817	42.271	W/m ² °C
SIN TAPA, DOBLE BOLSA DE GEL, SIN CAMBIO	λ	12.660	13.076	13.370	13.141	13.273	13.104	W/(m°C)	
	ΔT	4.763	4.611	4.510	4.589	4.543	4.626	°C	
	Características	6h – 60°C	9h – 60°C	9h – 60°C	9h – 60°C	9h – 60°C			

Tabla 9.30: Comparativo de resultados, para el basalto, gavión y gavión + ventilación. Nótese que el peso de la muestra de gavión (368.90Kg) resultó ligeramente mayor que la muestra con ventilación (359.90Kg). (Elaboración propia).

b) Gavión – Gavión + Ventilación.

El valor obtenido de λ promedio para la muestra con ventilación forzada resulta en un notable aumento ($2.252 < 13.104 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) esto debido a una drástica disminución en el valor de ΔT ($26.77 > 4.62^\circ\text{C}$) de 22.15K . En este caso el flujo de calor se da en mayor medida por convección, enfriando la cara expuesta al viento y llevando el calor a la cara opuesta.

Lo anterior puede apreciarse en la Figura 9.56, donde el efecto de enfriamiento para la cara expuesta al viento fue de 19K mientras que la cara opuesta fue de 8K. Por lo que además del enfriamiento convectivo al que puede verse sometido una envolvente a base de gaviones, también se presentará un flujo de calor al interior del espacio, no solo por una diferencia de temperatura sino porque el viento será el vehículo del flujo de calor.

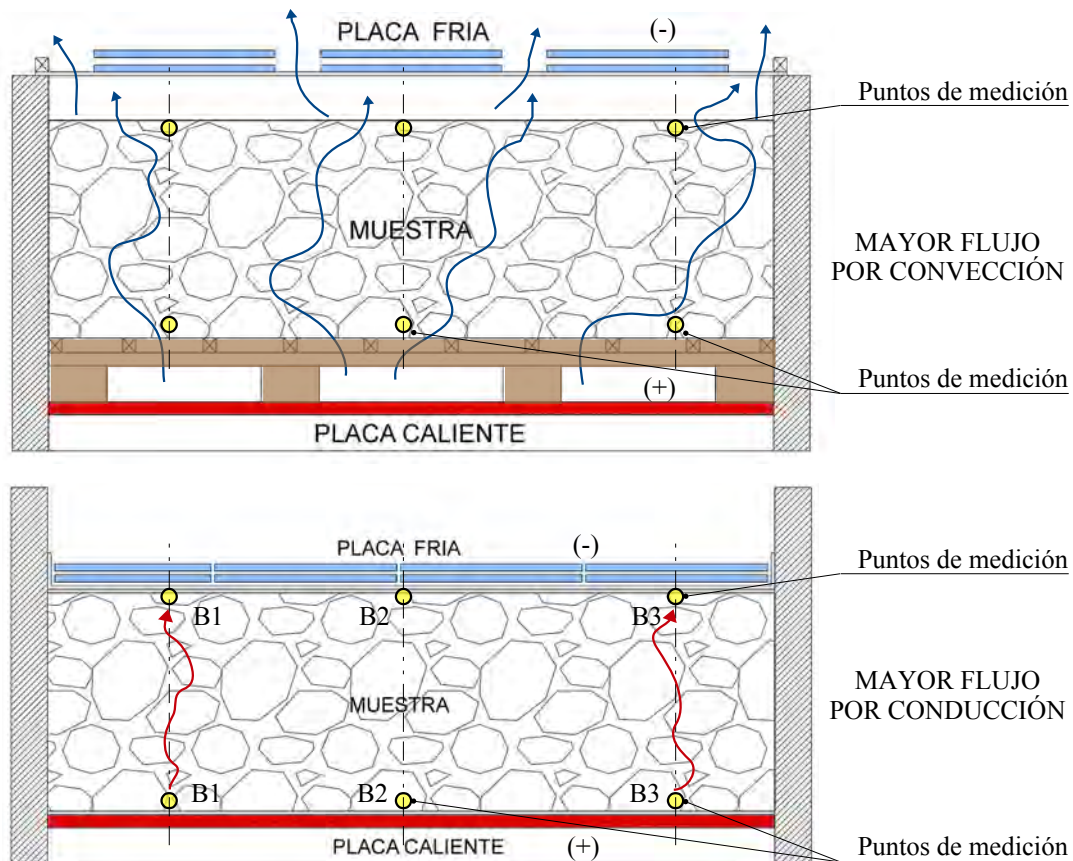


Figura 9.57: Diagrama de flujo de calor de una muestra de gavión y una expuesta a ventilación. En el caso de la muestra sin ventilación, el flujo de calor se da preferentemente por conducción entre roca y roca, ya que su resistencia térmica es menor que la que presenta el aire. En el caso de la muestra expuesta a ventilación forzada, el flujo de calor se da principalmente por convección, donde el viento toma calor de la cara expuesta y lo lleva a la cara opuesta. (Elaboración propia)

El flujo de calor a través de una envolvente de gaviones puede darse por medio de varios de los métodos de intercambio de calor, tales como conducción de roca a roca; conducción o convección a través del aire contenido en los poros entre rocas; y por radiación en el conjunto de sólidos. La conductividad térmica efectiva del sistema es la manifestación conjunta de todos estos procesos.

V. Resumen de propiedades termofísicas encontradas para las muestras de estudio.

$$p = \frac{m}{V} \quad Cp = \frac{\Delta t \times P}{M \times (T_o - (T_o - 1))} \quad \lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right)$$

Ecuación 9.10: Para estimar la densidad, Ecuación 9.9: Para estimar el calor específico, Ecuación 9.7: Para la conductividad térmica.

$$C = \frac{P}{A \times \Delta t} \quad R = \frac{b}{\lambda} \quad U = \frac{1}{R}$$

Ecuación 9.8: Para estimar conductancia térmica, Ecuación 9.11: Para estimar la resistencia térmica, Ecuación 9.12: Para estimar el coeficiente de conductividad térmica-U.

$$\alpha = \frac{\lambda}{p \cdot Cp}$$

Ecuación 9.13: Para estimar la difusividad térmica.

$$\Phi = 0.02303 * b \sqrt{\frac{1}{\alpha}}$$

Ecuación 9.14: Para estimar el retardo térmico.

Donde:

Símbolo	Definición	Unidades
p	= Densidad	Kg/m ³
m	= masa de la muestra	kg
V	= volumen de la muestra	m ³
C_p	= Calor específico	J/kg °C
Δt	= Intervalo de medición	s
P	= potencia de la resistencia	W
M	= masa de la muestra	kg
T_o	= temp en un tiempo	°C
T_{o-1}	= temp en un tiempo anterior	°C
λ	= Conductividad térmica	W/m °C
P	= potencia de la resistencia	W
L	= separación entre placas	m ²
A	= área de medición	m ²
ΔT	= diferencia de temperatura	K
C	= Conductancia térmica	W/m °C
P	= potencia de la resistencia	W
A	= área de medición	m ²
ΔT	= diferencia de temperatura	K
R	= Resistencia térmica	m ² °C/W
b	= espesor de la muestra	m ²
λ	= conductividad térmica	W/m °C
U	= Coeficiente de transmisión-u	W/m ² °C
R	= resistencia térmica	m ² °C/W
α	= Difusividad térmica	m ² /h
λ	= conductividad térmica	W/m °C
p	= densidad	Kg/m ³
Cp	= calor específico	J/kg °C
Φ	= Retardo térmico	h
b	= espesor de la muestra	m ²
α	= difusividad térmica	m ² /h

Tabla 9.31: Símbolos, definiciones y unidades para determinar el resumen de las principales propiedades termofísicas de la muestra de estudio. (Elaboración propia)

PROPIEDADES TERMICAS BASALTO 21mm							
Kg/m ³	J/kg °C	W/m °C	W/m ² °C	m ² °C/W	W/m ² °C	m ² /h	h
ρ	Cp	λ	C	R	U	α	Φ
2,065.48	868.36	2.184	167.995	0.006	167.995	0.00000122	0.438

PROPIEDADES TERMICAS GAVION 0.30 m							
Kg/m ³	J/kg °C	W/m °C	W/m ² °C	m ² °C/W	W/m ² °C	m ² /h	h
ρ	Cp	λ	C	R	U	α	Φ
1,229.67	868.36	2.252	7.264	0.133	7.506	0.00000126	6.166

PROPIEDADES TERMICAS GAVION + VENTILACION 0.30 m							
Kg/m ³	J/kg °C	W/m °C	W/m ² °C	m ² °C/W	W/m ² °C	m ² /h	h
ρ	Cp	λ	C	R	U	α	Φ
1,199.67	868.36	13.104	42.271	0.023	43.680	0.00000731	2.556

Tabla 9.32: Tabla de principales propiedades termofísicas encontradas para las muestras de estudio. Para el cálculo de la difusividad de ambas evaluaciones del gavión se utiliza la densidad del basalto (2,065.48 kg/m³) a pesar de que el sistema es menos denso. Ya que el responsable de la inercia térmica es la masa representada por la roca y no por el aire. (Elaboración propia)

El tiempo de retardo térmico para la muestra de gavión es de 6.16 horas cuando no se expone a ventilación forzada, mientras que cuando se expone a una velocidad de viento de 1.2 m/s se presenta un retardo de 2.55 h, dado el aumento en la conductividad del sistema. Comparando con los datos de retardo de la tabla siguiente, puede decirse que el gavión presenta un retardo medio alto, mientras que cuando se expone a una velocidad de viento de 1.2 m/s presenta un retardo bajo. Hay que considerar que el enfriamiento provocado por el paso del viento a través del sistema intervienen otros factores como la temperatura del viento, la temperatura de la superficie en contacto, entre otros.

Tiempos de inercia térmica			
Material	Espesor en Centímetros	Retraso en Horas	Fuente
Piedra	20	5.5	1
	35	8	
Concreto	15	3.8	
	20	5.1	
	30	7.8	
Ladrillo común	10	2.3	
	20	5.5	
Concreto	15	4	2
	20	5.4	
Ladrillo común	10.5	2.6	
	22	6.1	
	33.5	9.4	
No.	Fuente		
1	Olgyay, Victor. (2010). Arquitectura y Clima, manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.		
2	Szokolay, S. (2008). Introduction to Architectural Science The Basis of Sustainable Design		

Tabla 9.33: Tiempos de retraso térmico para distintos materiales.

10.- Conclusiones.

I. Respecto a la hipótesis.

La hipótesis principal planteada en esta investigación sostiene primero, que las construcciones animales, al menos las aquí presentadas, contienen mecanismos que intentan regular la condición climática interior. Mecanismos tales como la orientación de la construcción, la ventilación y la regulación térmica, entre otras. Segundo, que estos mecanismos una vez identificados es posible reinterpretarlos y aplicarlos a envolventes y sistemas de climatización pasiva de las construcciones humanas.

Todo esto con la finalidad de robustecer algunas de las herramientas del diseño arquitectónico al menos aquellas que aportan fuentes de información útiles para generar decisiones de diseño que fomentan el uso de sistemas de climatización de bajo impacto ambiental, como sería el diseño de las envolventes en los edificios.

En cuanto a la primera parte de la hipótesis es posible sostener con los resultados obtenidos que las construcciones animales de los 5 casos de estudio aquí expuestos sí contienen funciones y mecanismos que permiten regular las condiciones del clima al interior.

Esto puede constatarse en las fichas sintéticas de estrategias encontradas para la muestra de estudio (cap. 6), aquí se presenta una síntesis de los mecanismos y funciones encontrados. Se describen aquellas referentes a los tres ejes de estudio planteados en cuanto a orientación, ventilación y termoregulación, también se incluyen mecanismos que no se mencionan directamente en las investigaciones especializadas pero que es posible deducirlos mediante los criterios de la arquitectura bioclimática. Cómo el EED expuesta para el caso de la envolvente porosa de los montículos de las termitas *Macrotermes michaelseni*.

La segunda parte de la hipótesis se expone a partir del desarrollo de la envolvente propuesta. Esto incluye primeramente el estudio comparativo de las funciones encontradas y el análisis climático (cap. 7), con los cuales es posible seleccionar algunos de los mecanismos a aplicar y ubicarlos a una condición climática específica. Segundo con base en la propuesta de utilización, modificación y adecuación de una envolvente basada en un sistema constructivo existente, lo que a través del diseño, permite la interacción de los mecanismos determinados.

Es así que se sostiene que se generó una base de conocimientos al servicio del diseño a partir de los mecanismos de climatización pasiva contenidos en algunos ejemplos de la arquitectura animal. Información utilizada para proponer el uso de una envolvente porosa a partir de muros gaviones, sin embargo los descubrimientos y metodología aquí expuesta son capaces de generar otras aplicaciones.

II. Respecto a la metodología.

En cuanto a aquellos que deseen ampliar el conocimiento de los sistemas de climatización contenidos en sistemas naturales encontrarán en la metodología un procedimiento útil en cuanto a la interpretación de información basada en estudios provenientes de áreas distintas al diseño. La estructura planteada para cada caso de estudio (cap. 5) permite ordenar los descubrimientos en cuanto a la estrategia o función principal descrita en las investigaciones (orientación, ventilación, termoregulación), sin embargo es posible incluir otros mecanismos que enriquezcan los resultados.

Por otro lado la modelización de funciones (cap. 7) expone el uso de herramientas útiles para interpretar los descubrimientos, como son la matriz de estrategias de climatización (Watson y Labs, 1983), los diagramas sintéticos de funciones aquí propuestos y la confrontación de los mecanismos encontrados con un análisis climático que permite perfeccionar la selección y ubicación de las estrategias a aplicar con una condición climática específica.

Los mecanismos de climatización pasiva encontrados para la muestra de estudio son la base con la que se propone el uso de una envolvente porosa, sin embargo estos mecanismos y el resto de las estrategias encontradas son un acervo de conocimientos disponibles para otros diseñadores que busquen proponer aplicaciones basadas en sistemas naturales. Esto puede consultarse de manera rápida en la síntesis de estrategias del capítulo 6 o de manera más profunda en el desarrollo de cada caso de estudio en el capítulo 5.

III. Respecto a la aplicación.

En cuanto al reto de diseño propuesto, “Diseño de una envolvente porosa para climas cálido – secos con cualidades de inercia térmica, ventilación y enfriamiento evaporativo directo”.

Hay que considerar que la parte de modelización de estrategias y el diseño conceptual de la aplicación (cap. 7 y 8) es aquella que permite enlazar la investigación exploratoria de la primera parte (cap. 5 y 6) con la parte final de evaluación experimental de la aplicación (cap. 9). Debido a que se desarrolla a partir de herramientas analíticas como los diagramas y matrices, tanto como por un filtro creativo propio del diseño. A través del diseño es posible seleccionar creativamente algunos mecanismos de climatización posibles de interactuar entre sí, provenientes de distintas construcciones animales de una amplia variedad de climas, para conjuntar esta selección en una envolvente arquitectónica.

El reto de diseño se cumple de forma cualitativa a partir de encontrar un sistema constructivo existente que con base en algunas modificaciones y adecuaciones permite que los mecanismos encontrados interactúen dentro de la envolvente como se muestra en el capítulo 7. Y de forma cuantitativa con base en la evaluación de cada uno de los mecanismos seleccionados para la muestra de estudio, porosidad, ventilación e inercia térmica.

A pesar que la evaluación de las capacidades de EED de la envolvente propuesta no se desarrolla en esta investigación, los resultados de la evaluación de porosidad y porcentaje de absorción (cap. 7) de la muestra resultan útiles para futuras investigaciones.

IV. Respecto a la evaluación de la aplicación.

Si bien existen algunos ejemplos de edificios que han implementado el uso de gaviones como parte de los sistemas de climatización pasiva, no se reportan en investigaciones los valores relativos a las cualidades térmicas o de ventilación.

Los resultados aquí obtenidos, en la evaluación experimental demuestran que es posible generar envolventes porosas a partir de gaviones de piedra. Para los gaviones aquí evaluados se encontró un coeficiente de porosidad promedio del 47%, es decir que casi la mitad del volumen del gavión es vacío, y que este valor proviene de los vacíos creados artificialmente entre roca y roca, mientras que los poros inherentes a cada una de las rocas no son relevantes ya que representan menos del 1% de la masa o del volumen.

Por lo anterior también es válido suponer que el porcentaje de porosidad es posible de modificarse mediante el uso de agregados de distintos tamaños y con ello diferenciar áreas de ventilación, como se propone en el diseño conceptual.

En conjunto con la evaluación de ventilación es posible sostener que este tipo de envolventes permiten el paso del 20% del volumen de viento que atraviesa una abertura simple como sería una ventana tradicional. Esto es suficiente para cumplir con una de las funciones de la ventilación que sería la renovación del aire interior. De manera cualitativa es posible observar la ventilación a través de la envolvente porosa en los vídeos adjuntos, en particular donde se aprecia el movimiento del flujo al atravesar el gavión (Plano 2, Sección Z, Porosa).

En cuanto a la capacidad de ventilación para disipar calor los resultados obtenidos son insuficientes para demostrar estas capacidades, sin embargo es posible que una envolvente a partir de gaviones por sí sola resulte insuficiente para cumplir con este objetivo, ya que usualmente se requieren mayor volumen de aire para esto. Lo que puede sostenerse es que una envolvente de este tipo sería complementaria a otros sistemas que intentan regular el ambiente térmico interior de forma pasiva.

En cuanto a la evaluación térmica se concluye que una envolvente porosa a base de gaviones presenta un retardo térmico de 6.16h mientras que cuando se expone a una ventilación forzada a 1.2 m/s el retardo se modifica a 2.55h.

Los datos anteriores demuestran que los gaviones tienen suficientes capacidades de retardo térmico y de ventilación como para formar parte de los sistemas de climatización pasiva de una edificación. Sin embargo una propiedad puede disminuir a la otra si no se planea a detalle los horarios de uso. Por lo que el diseño térmico y de ventilación debe realizarse de forma conjunta considerando la correcta orientación solar - eólica, con datos horarios más que mensuales, para el microclima donde se pretende ubicar.

Otra consideración que no se incluyó en este trabajo y que se debe tener en cuenta para la mejora del sistema constructivo, es la cantidad de radiación incidente absorbida por el material debido a sus características superficiales. La absorptancia de la muestra de basalto debido a su color gris oscuro, debe ser alta. Según la base de datos del *software* Ener-Habitat la absorptancia para colores oscuros es de 0.70. Por otro lado una roca con menor conductividad podría otorgar un tiempo de retraso más largo, por lo que se recomienda realizar pruebas con otro tipo de rocas o incluso con concreto proveniente de demolición ya que presenta menor conductividad.

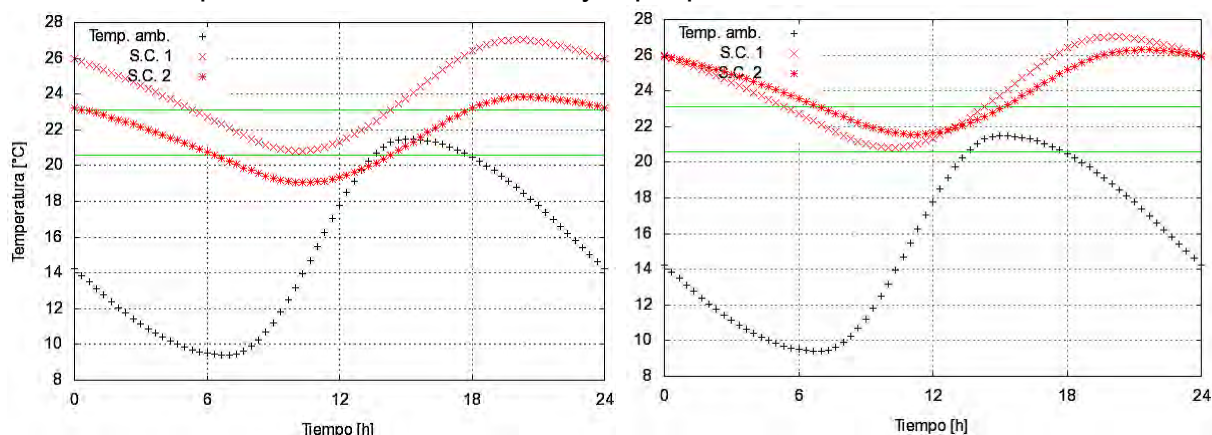


Figura 10.1: Desempeño térmico de un gavión con los datos obtenidos en esta investigación sobre densidad, conductividad y calor específico. Izquierda, comparativo de un gavión S.C.1 con valores de densidad ($2,065.48\text{kg/m}^3$), conductividad ($2.252\text{W/m}^\circ\text{C}$) y calor específico ($868.36\text{J/kg}^\circ\text{C}$) y absorptancia de 0.70. Con un gavión S.C.2 con los mismos valores excepto una absorptancia de 0.50.

Derecha, comparativo de un gavión S.C.1 con valores de densidad ($2,065.48\text{kg/m}^3$), conductividad ($2.252\text{W/m}^\circ\text{C}$) y calor específico ($868.36\text{J/kg}^\circ\text{C}$) y absorptancia de 0.70. Con un gavión S.C.2 con los mismos valores excepto una conductividad de $1.5\text{W/m}^\circ\text{C}$. Ambos comparativos para el mes de enero, en la ciudad de Mexicali, para un muro con orientación sur y un espesor de 0.30m. Simulación realizada en Ener-Habitat, <http://www.enerhabitat.unam.mx/>.

Como se observa en las gráficas de anteriores, un gavión con diferentes valores de absorptancia presenta un desempeño térmico distinto, el S.C.1 muestra un tiempo de retraso de 6.9h mientras que el S.C.2 uno de 7.1h. Por otro lado el mismo sistema constructivo pero con una diferencia en el valor de conductividad presenta un retardo para el S.C.1 de 6.9h contra 8.3h para el S.C.2.

10.2.- Recomendaciones de diseño.

En general como recomendaciones de diseño, durante los periodos donde la temperatura del aire sea mayor a la temperatura del cuerpo humano (35°C) es necesario enfriarlo antes de permitir su acceso al espacio ya sea implementando el riego por goteo interno aquí propuesto de forma conceptual o por otros medios (fuentes, estanques, rociadores) también considerar un sistema de paneles que impidan su acceso al interior del edificio en los periodos más cálidos.

La orientación Oeste podría ser la mejor para aprovechar las 6 horas de retardo térmico desplazándolas lo más posible hacia la noche, sin embargo si se desea ventilar a través del gavión hay que considerar que por las tardes se presentan las mayores temperaturas y podría no ser recomendable ventilar en climas extremos.

En general la orientación Sur y Suroeste de una envolvente a base de gaviones será recomendable, ya que presenta un buen número de horas de asoleamiento. La orientación Este y Sureste es preferible utilizarla para ganancias directas a través de superficies acristaladas, ya que usualmente los climas cálido-secos presentan mañanas frías.

La orientación solar deberá acompañarse con un sistema que permita al usuario cerrar la envolvente porosa hacia el exterior para no introducir ni aire muy caliente ni muy frío, que por otro lado reduce la cantidad de calor que absorbe la masa del muro. Este sistema entre otros puede ser a base de paneles corredizos que cierren por dentro para evitar que ventile durante periodos extremos, pero que mantengan expuesta a la radiación solar la envolvente. Y por fuera para evitar que las ganancias térmicas se pierdan hacia el exterior por las noches.

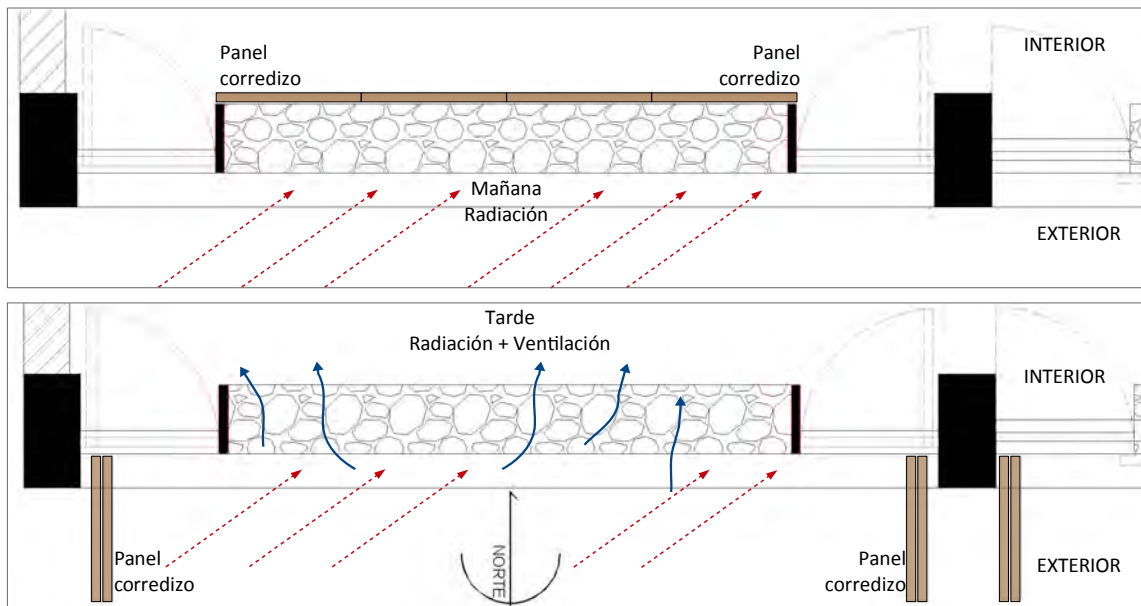


Figura 10.2: Esquema conceptual de paneles para regulación de la ventilación y la masa térmica. (Elaboración propia)

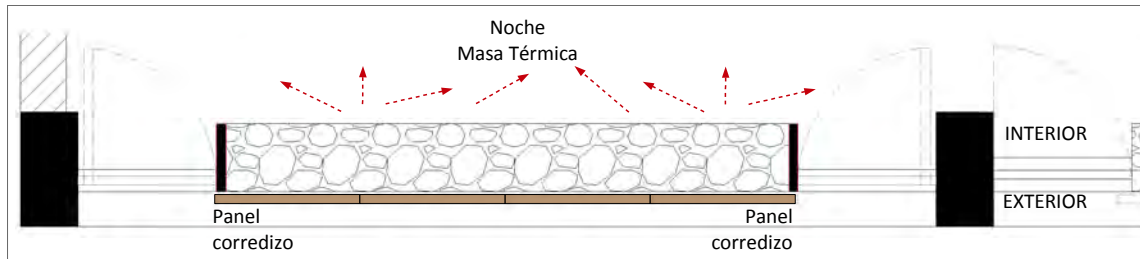


Figura 10.3: Esquema conceptual de paneles para regulación de la ventilación y la masa térmica. Otra opción es considerar paneles corredizos de cristal solo para la parte exterior, estos en combinación con la radiación solar aumentarán la cantidad de energía térmica que absorbe el muro mientras que protegen durante periodos fríos. (Elaboración propia)

10.3.- Género de edificios donde pueden aplicarse gaviones.

El uso de gaviones en la arquitectura contemporánea ha sido discreto, en general además de aprovechar sus cualidades estructurales, recientemente se ha utilizado por las cualidades estéticas de la piedra, sin embargo ha sido poco explorada la posibilidad de integrarlo a sistemas de climatización pasiva. Se ha implementado en distintos usos, tanto públicos como privados, y en climas muy variados. A continuación se presenta una breve lista de edificios que han utilizado gaviones como parte de su envolvente, algunos de estos en México.

Uso	Ubicación	Diseño	Clima	Gaviones
Orfanato	Mali, Africa	F8 Architecture	Cálido – Húmedo	Masa
Casa habitación	Los Cabos, BCS	Colectivo MX	Cálido – Seco	Masa Ventilación
Casa Club Bosque Altozano	Morelia, Michoacan	Parque humano	Templado	Masa Ventilación
Biblioteca pública Villanueva	Villanueva, Colombia	Meza, Piñol, Ramírez, Torres	Cálido – Húmedo	Masa Ventilación
Hanil Visitors Center & Guest House	Korea	Byoungsoo Cho	Templado – Húmedo	Masa

Tabla 10.1: Lista de algunos edificios que han utilizado gaviones como parte de su envolvente. Se menciona en la última columna si se han utilizado con alguna función de masa o ventilación. (Elaboración propia)



Figura 10.4: Izquierda, orfanato Falatow Jigiyaso, Mali. Derecha, Casa Gavión, Los Cabos, BCS. Fuente: inhabitat.com.



Figura 10.5: Arriba, Casa club Bosque Altozano, Morelia, Michoacan. Fuente: www.archdaily.com. y Biblioteca pública en Villanueva, Colombia. Fuente: www.archdaily.com. En este último caso el uso de masa y ventilación es más claro, ya que la mayoría del perímetro del edificio mantiene la porosidad en ambas caras de los gaviones.

Abajo, Centro Hanil y casa de visitantes, Korea. Fuente: www.archdaily.com. En este último caso los gaviones están rellenos con concreto proveniente de demolición.



En los ejemplos anteriores los gaviones han sido utilizados principalmente por las cualidades de inercia térmica de la piedra, en algunos casos se ha incluido también la cualidad porosa en cuanto a sus capacidades para ventilar, particularmente en la biblioteca en Villanueva, Colombia. Donde se requiere además de disipar calor también es necesario controlar la alta humedad.

Otro ejemplo interesante es el de la *Stone House* de *Sambuichi Architects*, en Shimane Japón. Donde el clima presenta veranos cálido - húmedos y en invierno nevadas. La casa se encuentra semi enterrada en un talud de gaviones de piedra, como regulador de la temperatura y la humedad. La gran masa de rocas le dan estabilidad térmica mientras que la porosidad de los gaviones permite que no se almacene humedad en el terreno circundante, ya sea por las nevadas o por los campos de arroz que rodean la casa.



Figura 10.6: Fachada de acceso de la *Stone House* de *Sambuichi Architects*. Fuente: www.japan-architect.co.jp



Figura 10.7: Fachada posterior de la *Stone House* de *Sambuichi Architects*. Fuente: www.japan-architect.co.jp

I. Integración del sistema a edificios existentes.

Otra aplicación para envolventes a base de gaviones puede aplicarse en edificios existentes, donde una envolvente o parte de ella puede integrarse en diferentes áreas de un edificio. La opción más efectiva es integrarse al sistema de muros perimetrales del edificio, lo que la convierte en una opción versátil y adecuada para un amplio rango de usos.

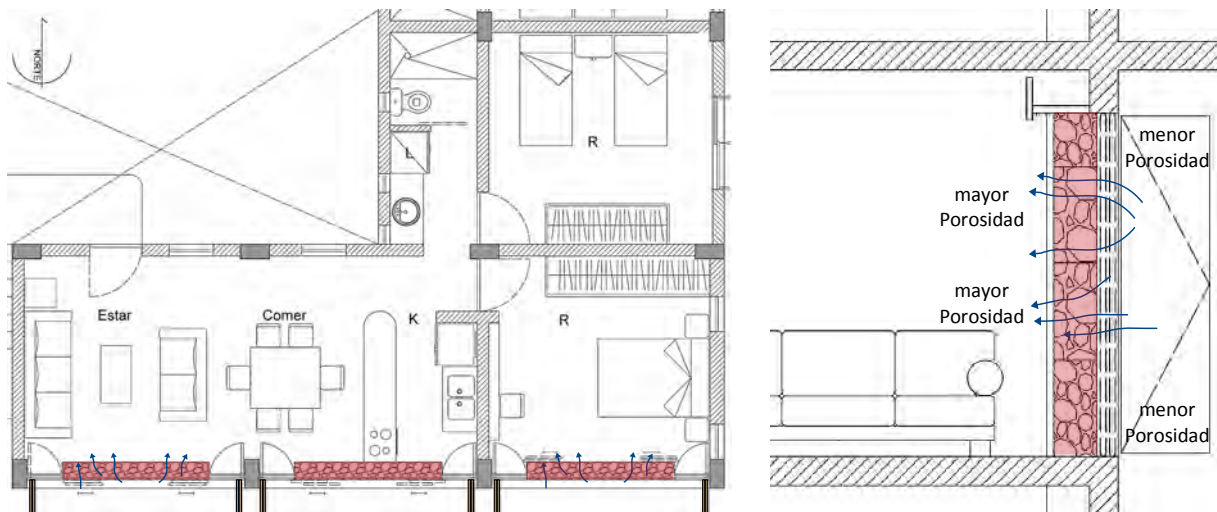


Figura 10.8: Planta y corte de integración de envolvente de gaviones a edificio existente. Los gaviones pueden sustituir en parte al sistema perimetral de muros, quedando entre la estructura principal y definiendo zonas estratégicas de ventilación, por ejemplo a la altura de los ocupantes. (Elaboración propia)

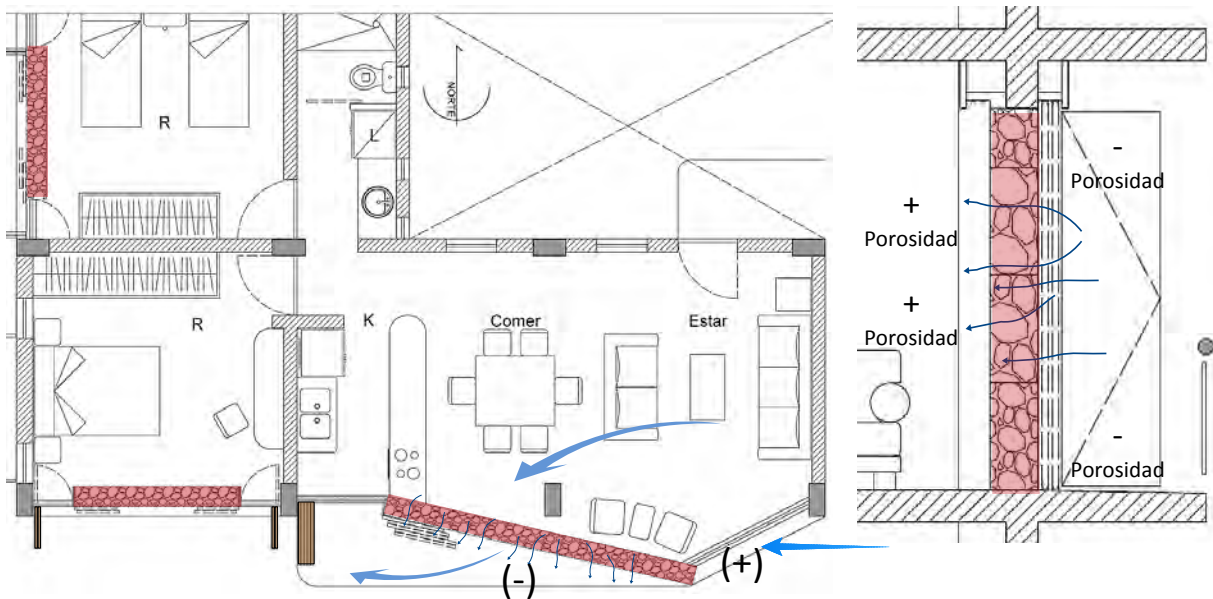


Figura 10.9: Planta y corte de integración de envoltura de gaviones a edificio existente. En los casos donde se tenga la posibilidad de un balcón, la envoltura porosa puede generar diferencias de presión para fomentar la ventilación. (Elaboración propia)

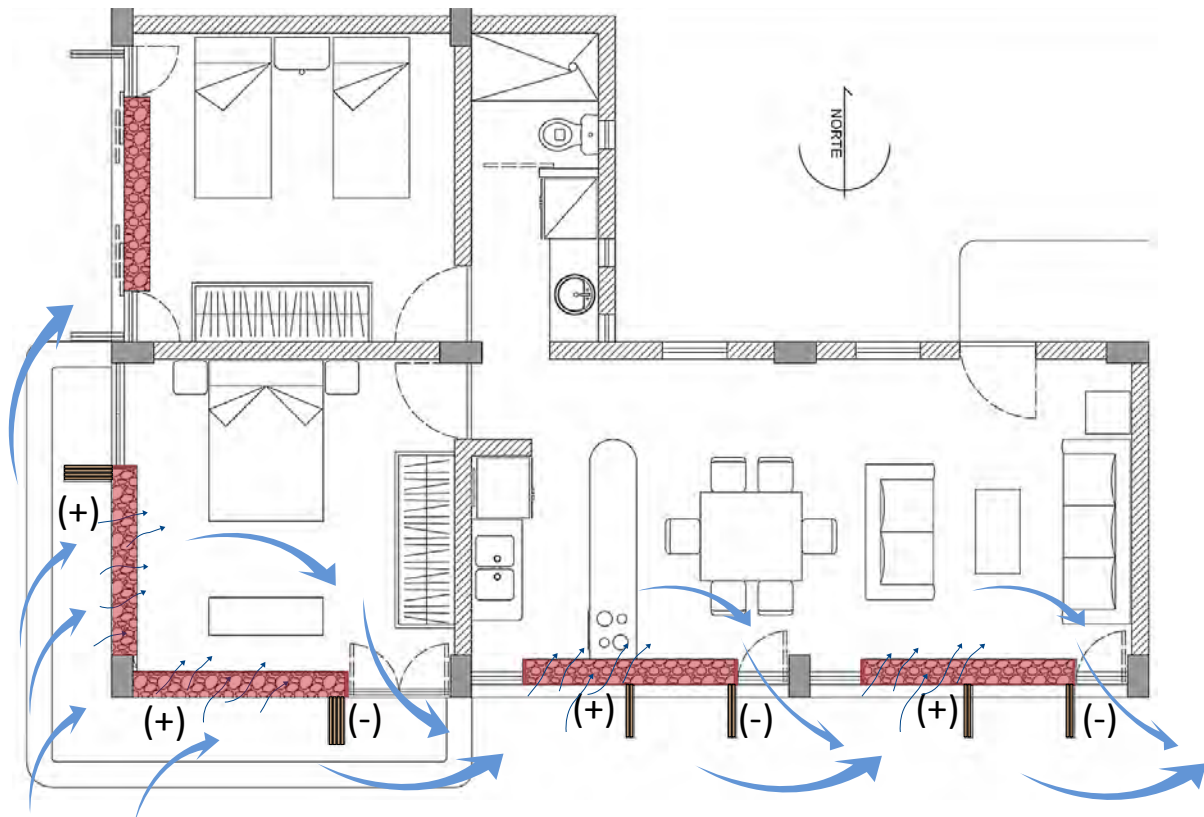


Figura 10.10: Planta de integración de envoltura de gaviones a edificio existente. Algunas posibilidades de esquemas de ventilación donde se pueden combinar el uso de la porosidad del gavión y las aberturas existentes. También es posible generar diferencias de presión utilizando los paneles móviles de control del gavión. (Elaboración propia)

Otras propiedades interesantes que permiten considerar a los gaviones como una opción viable para integrarlos en edificios existentes:

Comparativo del peso total de un muro de 2.5X2.4 y 0.30m de espesor				
Muro	ρ (kg/m ³)	A (m ²)	V (m ³)	W _{total} (kg)
Piedra (basalto)	2,239.49	6.00	1.80	4,031.07
Concreto simple	2,200.00	6.00	1.80	3,960.00
Tabique rojo recocido	2,000.00	6.00	1.80	3,600.00
Gavión con basalto	1,229.67	6.00	1.80	2,213.41

Tabla 10.2: Si se compara el peso de un muro en distintos materiales, se obtiene que un muro tradicional de piedra es el más pesado, mientras que un gavión dado que es 47% poroso casi la mitad del volumen es ocupado por aire. Valores de densidad del concreto y tabique según la NOM-008-ENER-2001. Valor de densidad de la piedra basalto, obtenido durante el análisis de porosidad en el capítulo 8. (Elaboración propia)

Los eco-indicadores son valores que reflejan el impacto ambiental de los materiales, procesos, transporte, energía, reciclado y tratamiento de desperdicios. A continuación se muestra los valores reportados en la guía europea Ecolizer 2.0, desarrollado para productos, procesos, uso de energía, etc. europeos, por lo que su utilización para otros países debe hacerse teniendo en cuenta que puede tener importantes variaciones.

Como resultado de estos estudios se generó una tabla de valores numéricos que representan el impacto ambiental en función de la cantidad o volumen de cada material o proceso. Para Ecolizer 2.0 se utiliza la unidad milipunto (mPt) que no tiene una equivalencia a ninguna otra unidad, sirve simplemente como comparativo para la toma de decisiones de diseño.

Impacto ambiental – Eco-indicador – Ecolizer 2.0			
Material	milipuntos (mPt)	W _{total} (kg)	milipuntos _{Total} (mPt)
Concreto simple / m ³	20,575.00	3,960.00	81,477,000.00
Basalto / Kg	44.00	4,031.07	177,367.29
Tabique / Kg	18.00	3,600.00	64,800.00

Tabla 10.3: Eco – indicadores para tres materiales utilizados como parte de la envolvente de un edificio. No se muestra el resultado para un gavión con basalto ya que no se cuenta con el indicador de la jaula metálica, sin embargo en comparación con el concreto el impacto ambiental tanto del tabique como el basalto es mucho menor. Fuente: Ecolizer 2.0

Anexo 1 – Reproducción de un medidor de flujo de calor, calibración y muestras de estudio.

Metodología.

- I. Reproducir el medidor de flujo de calor de placa caliente en formato pequeño (20X20cm).
- II. Calibración del equipo.
- III. Generar muestras del material base.

Material y equipo empleado.

- a) Medidor de flujo de calor de placa caliente.
- b) 4 Termopares tipo K.
- c) Adquisidor de datos - Módulo Adam 4018.
- d) Software LabVIEW para procesamiento de datos.
- e) Cámara termográfica Fluke Ti25.

- I. Reproducir el medidor de flujo de calor de placa caliente en formato pequeño.

Para la medición del retardo térmico del agregado a partir de basalto, se replicó el equipo de gran formato, tratando de mantener las características técnicas pero a una escala menor. Según la norma C518 – 10 de ASTM los especímenes de estudio deben cubrir el área total de la placa, cuando no es posible, la muestra al menos debe cubrir el área de medición y el resto del área debe quedar cubierto con una máscara de un material con conductividad térmica similar.

Sin embargo en este caso las muestras de estudio son piedras de entre 10, 15 y 20 cm aproximadamente por lo que el área de medición es muy distinta a la de un equipo de grandes dimensiones (1X1m) lo que aumenta la incertidumbre en los resultados a obtener.

- a) Descripción del medidor de flujo de calor de gran formato:

El equipo utilizado para determinar el retardo térmico del gavión es un conductímetro de gran formato (1X1m) construido con base en la norma C518 – 10 de ASTM. El funcionamiento del equipo está basado en medir el flujo de calor unidireccional a través del material muestra al cual se quiere conocer su conductividad térmica. Este se coloca entre dos platos paralelos a temperaturas constantes pero diferentes para forzar el flujo térmico (Terres Martínez, 2015).

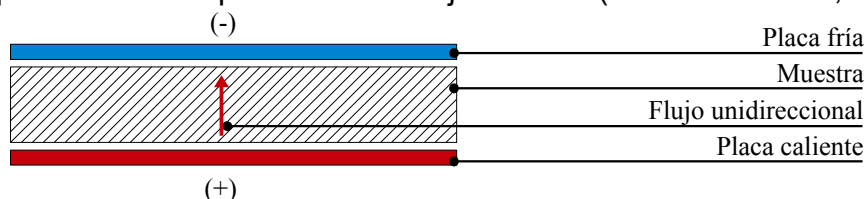


Figura A1.1: Figura esquemática del acomodo del aparato medidor de flujo de calor bajo el sistema de placa caliente guardada según Terres Martínez, 2014. (Elaboración propia)

El equipo utilizado cuenta con las siguientes características generales: Un cajón guarda a partir de MDF con dimensiones interiores 1.00 X 1.00 m. El interior de los muros del cajón contienen 2 capas aislantes de fibra cerámica de 25mm de espesor c/u. La placa caliente esta formada por una placa de acero de 1.00 X 1.00 m y 0.0127 m de espesor. En la cara superior expuesta a la muestra de estudio se colocó una ranura que alberga un termopar el cual controla la activación de la resistencia eléctrica. Esta última tiene una potencia nominal de 2,486.5 W y una potencia medida de operación de 194.51 W, controlada por un regulador de temperatura conformado por un pirómetro digital, una bobina y un relevador.

El objetivo de la placa fría es mantener una temperatura constante siempre por debajo de la placa caliente para crear un gradiente térmico que obligue al flujo de calor atravesar perpendicularmente la muestra de estudio. La placa fría está conformada por una bandeja de aluminio que contiene una doble capa de bolsas de gel refrigerante congeladas previamente (Terres Martínez, 2015).

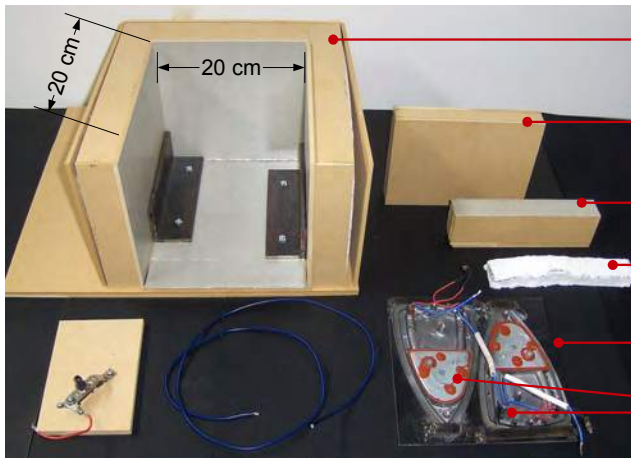
Como instrumentos de medición se utilizan 14 termopares tipo K conectados a dos módulos ADAM 40-18 y 40-18M que funcionan como adquirentes de datos que posteriormente se obtienen a través del software LabVIEW. Los termopares se colocan 7 sobre la cara expuesta a la placa caliente y 7 sobre la cara expuesta a la placa fría, asegurándose que estén verticalmente alineados unos con otros para así obtener una lectura perpendicular del flujo de calor (Terres Martínez, 2015).



Figura A1.2: Conductímetro de placa caliente guardada de gran formato (Terres Martínez, 2015). Imágenes cortesía de Guillermo Terres.

b) Descripción y construcción del medidor de flujo de calor en formato pequeño:

Para la reproducción del equipo en pequeña escala se seleccionó un panel de MDF debido a su baja conductividad térmica, similar al triplay ($0.115 \text{ W /m}^{\circ}\text{K}$ según la NOM 008 ENER 2001) como envolvente perimetral, esta se forró al interior con mica térmica a partir de moscovita por sus propiedades aislantes tanto eléctricas como térmicas. La placa caliente está formada por una placa de acero de 4mm de espesor a la cual se le montaron dos resistencias de 1200 W cada una, conectadas en serie. Para esto se aprovechó el armado de dos planchas eléctricas comerciales y del termostato de lámina regulable de una ellas para controlar la temperatura.



Envolvente perimetral de MDF
(5mm de espesor)

Compuerta

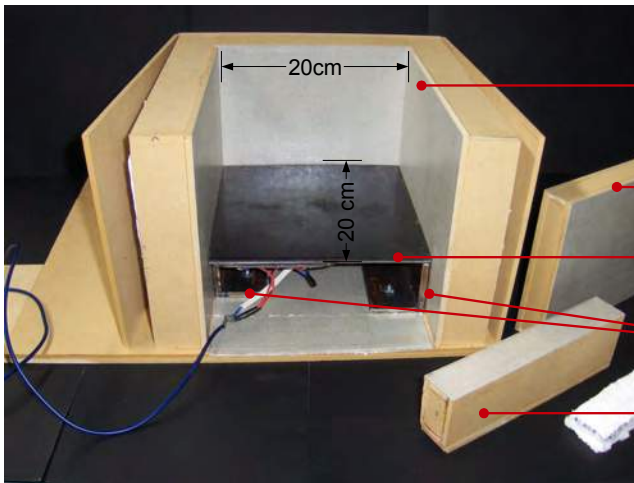
Base de compuerta

Aislante de fibra mineral (2cm)
para compuerta

Placa caliente de acero (4mm de
espesor)

Resistencias eléctricas
(1200 W c/u)

Figura A1.3:Fase inicial del medidor de flujo de calor de placa caliente. (Elaboración propia)



Envolvente perimetral con forro
interior de mica térmica

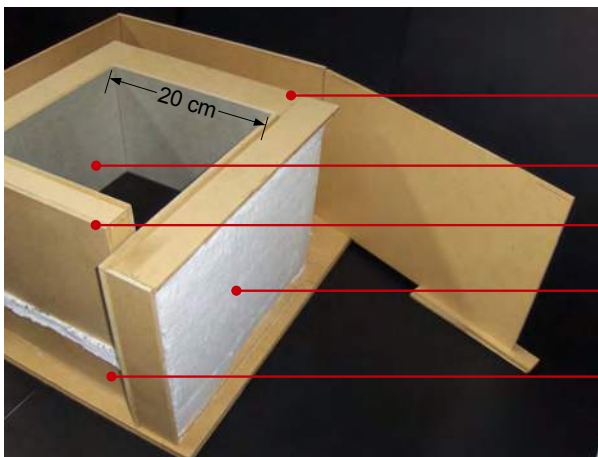
Compuerta con forro interior de
mica térmica

Placa caliente de acero (4mm de
espesor)

Bases para placa caliente

Base de compuerta

Figura A1.4:Armado inicial del medidor de flujo de calor. (Elaboración propia)



Envolvente perimetral de MDF
(5mm de espesor)

Forro interior de mica térmica

Compuerta

Doble capa de aislante de fibra
mineral (4cm)

Base de compuerta

Figura A1.5: Armado inicial del medidor de flujo de calor. La envolvente perimetral contiene aislante a partir de dos capas fibra mineral, misma que se colocó por debajo de la placa caliente y para colocar una calza entre las bases en "L" y la placa caliente, esto con la finalidad de romper el puente térmico. Igualmente la base de la compuerta y la compuerta contienen el mismo aislamiento al interior (Elaboración propia)

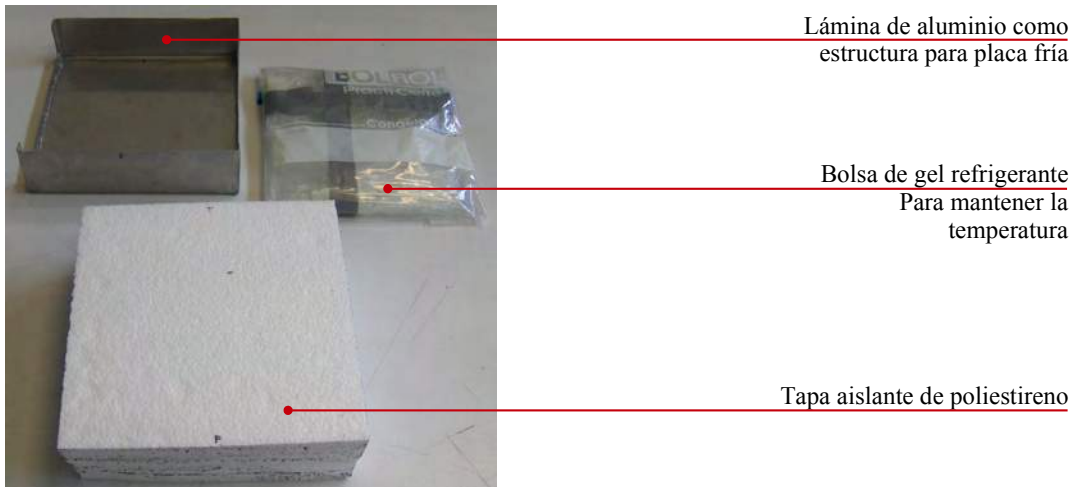


Figura A1.6: Elementos que componen la placa fría a colocar sobre la muestra de estudio. (Elaboración propia)

La placa fría en conjunto con la placa caliente, dirigen el flujo de calor en sentido perpendicular a través de la muestra de estudio. Esta constituida en este caso por una lámina de aluminio que funciona como una charola para la bolsa de gel, ambas piezas se refrigeran hasta que el contenido se encuentra congelado.

II. Calibración del equipo

La calibración del equipo se llevó a cabo mediante tres métodos. El primero consta de una medición de la temperatura de operación del equipo, esperando obtener una temperatura estable. El segundo tiene como objetivo determinar la distribución del calor sobre la placa caliente, esperando que sea homogénea, para esto se utilizó una cámara termográfica. Por último se llevó a cabo la calibración mediante la medición de un material de conductividad conocida para comparar ambos datos.

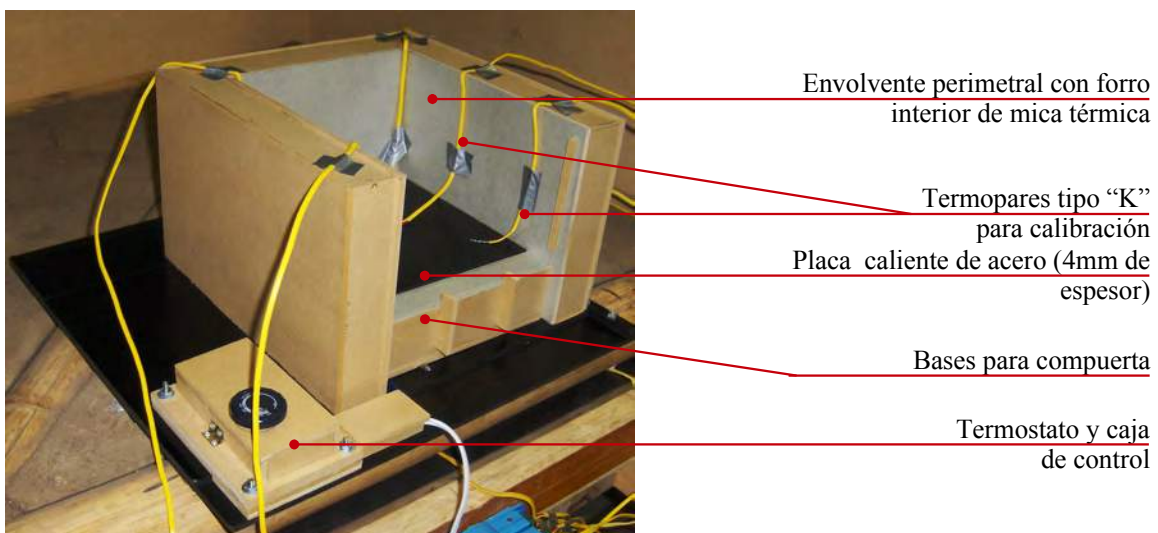


Figura A1.7: 1a prueba de calibración de la temperatura de operación del equipo. (Elaboración propia)

En la primer calibración se encendió el equipo durante 15 minutos, a la temperatura más baja permitida por el termostato, esperando que al término de ese tiempo poder realizar un aumento en la temperatura. Sin embargo se observó un notable sobre calentamiento del conductímetro, tanto en los datos transmitidos a la computadora como en una inspección visual, la temperatura de operación alcanzó los 120°C y no se tuvo control de esta.

Se concluye para esta primer calibración que el termostato de lámina regulable no es el adecuado, ya que este tipo de controles esta diseñado para trabajar al interior del equipo estando muy cerca del calor generado por la resistencia eléctrica, mientras que en este caso se colocó en una caja de control externa, lejos de la generación de calor.

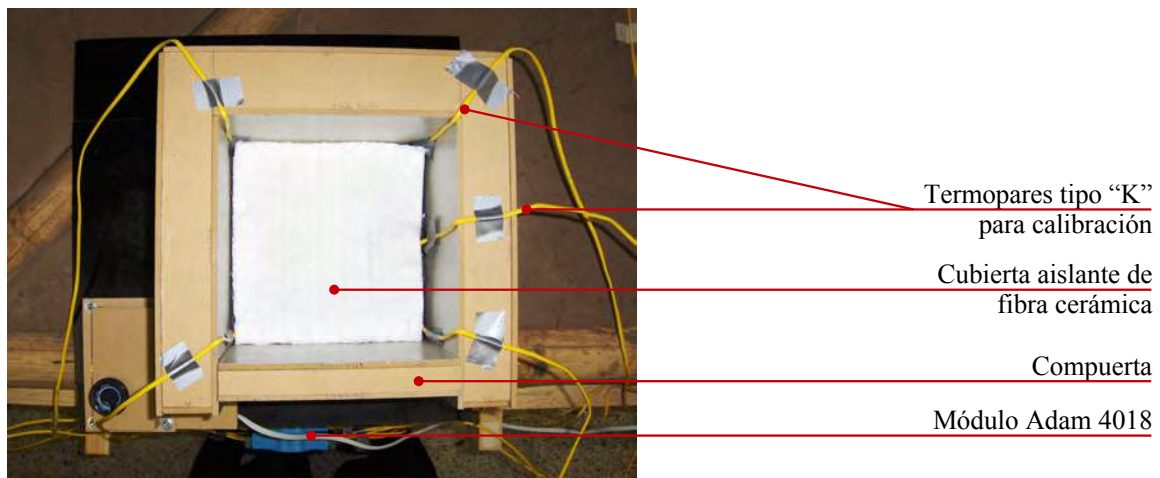


Figura A1.8: Vista superior del equipo durante la 1a calibración. Se colocaron 5 termopares en total, uno en cada esquina y el quinto al centro de la placa, el sobre calentamiento del equipo fue notable por lo que se recomienda no utilizar el equipo a temperaturas mayores a los 100° C . (Elaboración propia)

a) 1er ajuste durante la calibración de la temperatura de operación.

Se modificó el termostato que regula la temperatura de la placa caliente, con el fin de tener control sobre esta y obtener una temperatura estable para poder medir el flujo de calor a través de la muestra en estado estacionario.

Se seleccionó un termostato marca Caem t100, que maneja un rango de temperatura de 30 a 110°C, suficiente para probar materiales de construcción que en su operación normal no se ven expuestos a mayores temperaturas. Este tipo de equipos utilizan una sonda de cobre que viaja de la caja de control hasta el fondo de la placa caliente detectando la temperatura a la que está operando el equipo, por lo que es adecuado para colocarse lejos de la generación de calor.

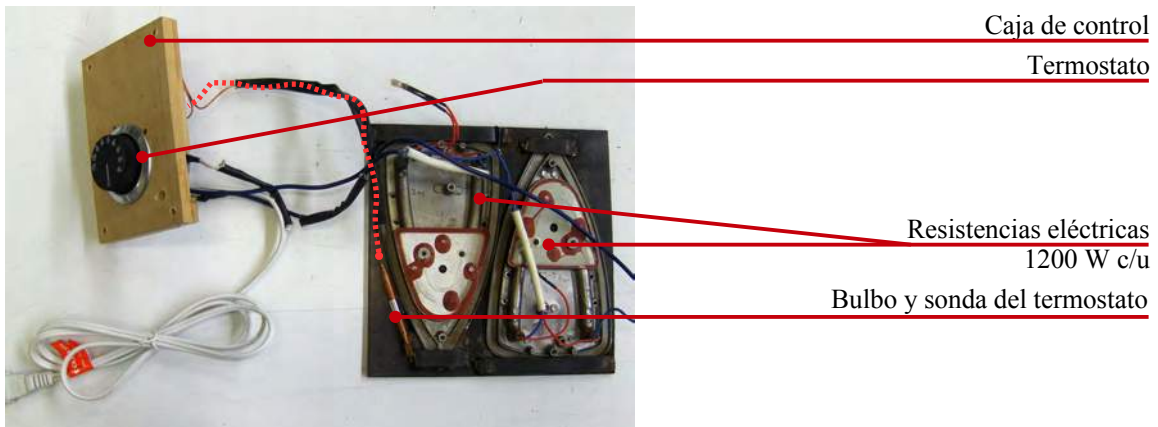


Figura A1.9: Placa caliente y modificación al control de temperatura. Se observa el bulbo y sonda que viajan de un extremo de la placa caliente al termostato. (Elaboración propia)

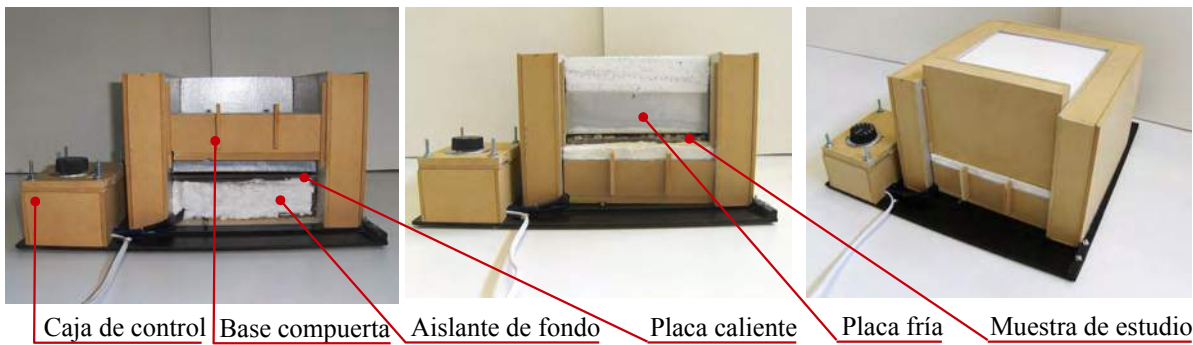


Figura A1.10: Segundo armado del medidor de flujo de calor, con ajuste en el control de temperatura. (Elaboración propia)

Después de cambiar el control de temperatura por el dispositivo antes mencionado, se repitió la prueba de calibración iniciando a 30°C y con una duración de poco más de 4.5 horas.

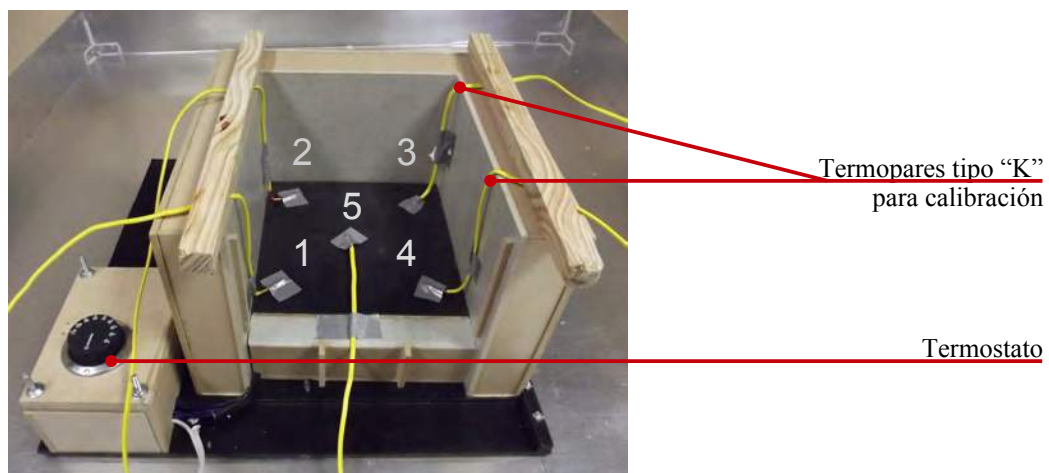


Figura A1.11: Ubicación de termopares para calibración. (Elaboración propia)

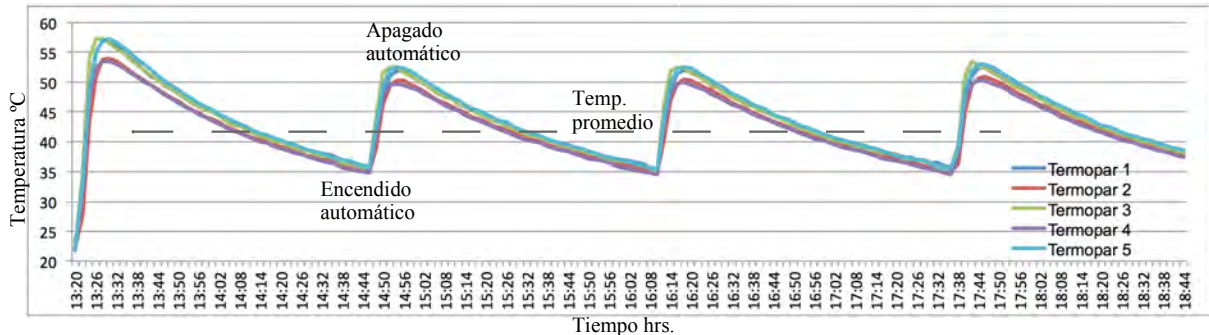


Figura A1.12: Gráfica de temperatura de operación en función del tiempo después del primer ajuste al controlador de temperatura. (Elaboración propia)

Como se observa en la gráfica anterior, la temperatura a la que opera el equipo tiene una variación de 15°C y a pesar de que el termostato fue ajustado a 30°C en promedio se presenta a 42.5°C aproximadamente. Los picos en la temperatura coinciden con el encendido y apagado automático del termostato, es decir si hay una regulación de la temperatura sin embargo el tiempo que pasa entre cada encendido y apagado es de 1.5 h aproximadamente lo que resulta en variaciones importantes.

b) 2do ajuste durante la calibración de la temperatura de operación.

Se decidió modificar por segunda vez el termostato por un equipo que presentará un control más fino de la temperatura. Por lo que se colocó un pirómetro digital modelo XMTG-818 con un rango de temperatura de -200 a 1600°C. Junto con un relevador de estado sólido, un termopar tipo “J” y un botón de encendido. En esta ocasión se ubicó el sensor del termopar entre las dos resistencias esperando obtener una lectura promedio de la placa caliente.

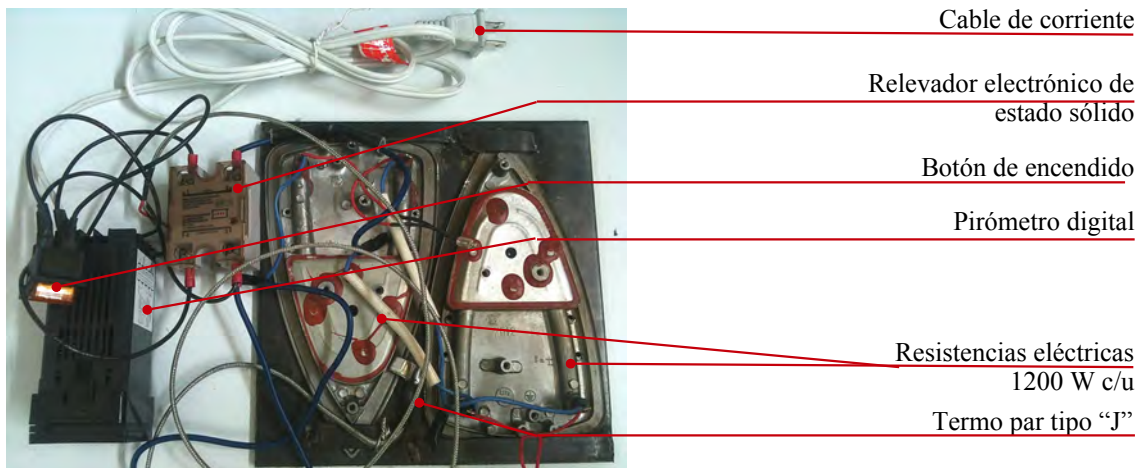


Figura A1.13: Armado de placa caliente con pirómetro digital, relevador y termopar. (Elaboración propia)

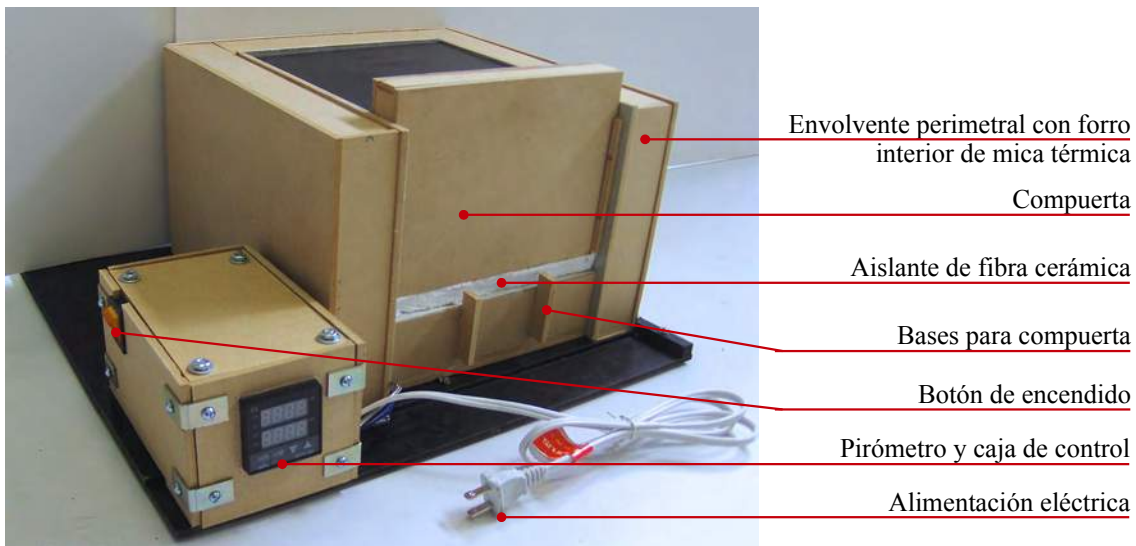


Figura A1.14: Tercer armado del medidor de flujo de calor, con ajuste en el control de temperatura. (Elaboración propia)

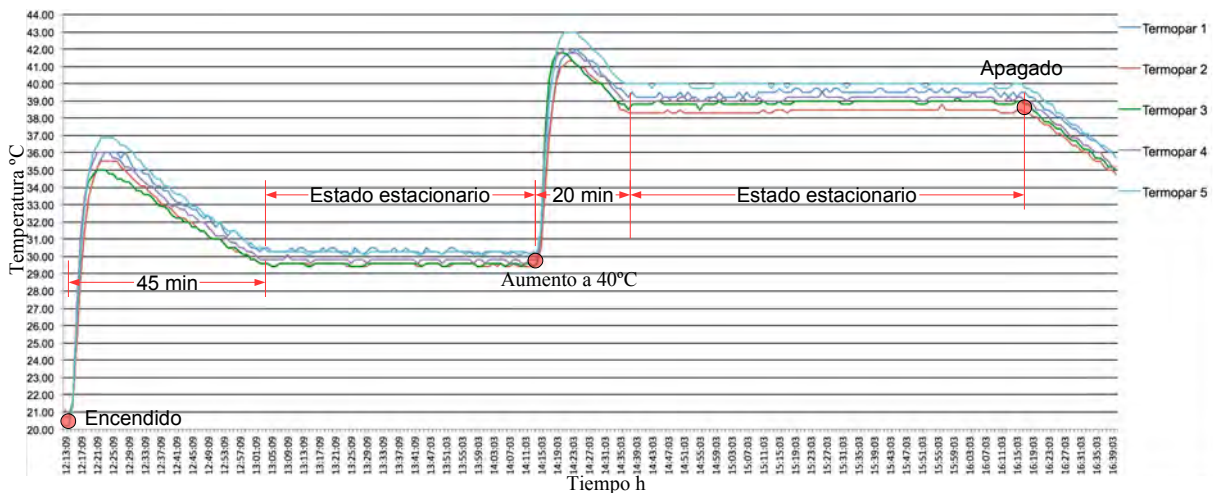


Figura A1.15: Gráfica de temperatura de operación en función del tiempo después del tercer ajuste al controlador de temperatura.

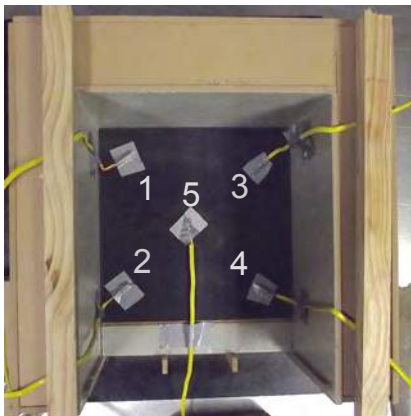


Figura A1.16: Ubicación de termopares sobre la placa caliente. (Elaboración propia)

Se repitió la calibración con una duración total de 4h, iniciando a 30°C durante 2h, posteriormente se aumentó a 40°C por otras 2h. Se observa en la gráfica anterior que al equipo le toma aproximadamente 45min operar a una temperatura estable, después de los cuales se observa que se ha alcanzado un estado estacionario, es decir sin variación de temperatura en el tiempo. Después del aumento a 40°C, tarda 20min en operar a estado estacionario, por lo que se concluye que se recomienda considerar un tiempo de espera inicial de 60min para la operación en estado permanente.

c) Calibración de la distribución de calor sobre la placa caliente.

Como se mencionó en la metodología el objetivo de esta calibración es diagnosticar la distribución de calor sobre la placa caliente, para esto se utilizó una cámara termográfica que permite mostrar el patrón de flujo calor en la superficie de la placa.

Las cámaras termográficas permiten observar la distribución de calor sobre una superficie a partir de medir la radiación infrarroja que emiten los cuerpos en función de su temperatura. Sin embargo la intensidad de la radiación infrarroja también depende de otras características de la superficie del objeto como el color, emisividad o el tipo de material. Por lo que dos cuerpos a la misma temperatura pueden emitir radiación infrarroja diferente (Terres Peña, 2010).

Por lo anterior y al menos para este estudio se considera esta evaluación de carácter cualitativo es decir se evalúa la distribución de calor sobre la placa caliente sin considerar la intensidad de esta.

La prueba se realizó durante 1.5 h durante las cuales se configuró el conductímetro a 3 temperaturas, 40, 50 y 60°C. Para la toma de imágenes infrarrojas se colocaron papeles de color negro en los muros interiores del conductímetro ya que la mica térmica con la que están forrados es muy reflejante en comparación con la placa caliente y distorsiona la estimación de la distribución térmica. El equipo se colocó sobre placas de MDF tratando de evitar superficies demasiado reflejantes, como la cerámica del piso. Por otro lado se configuró la cámara termográfica a una emisividad de 0.96 para objetos tales como acero, como recomienda el manual de uso.



Figura A1.17: Cámara termográfica Fluke Ti25. (Elaboración propia)

Prueba a 40°C durante 0.50 h.

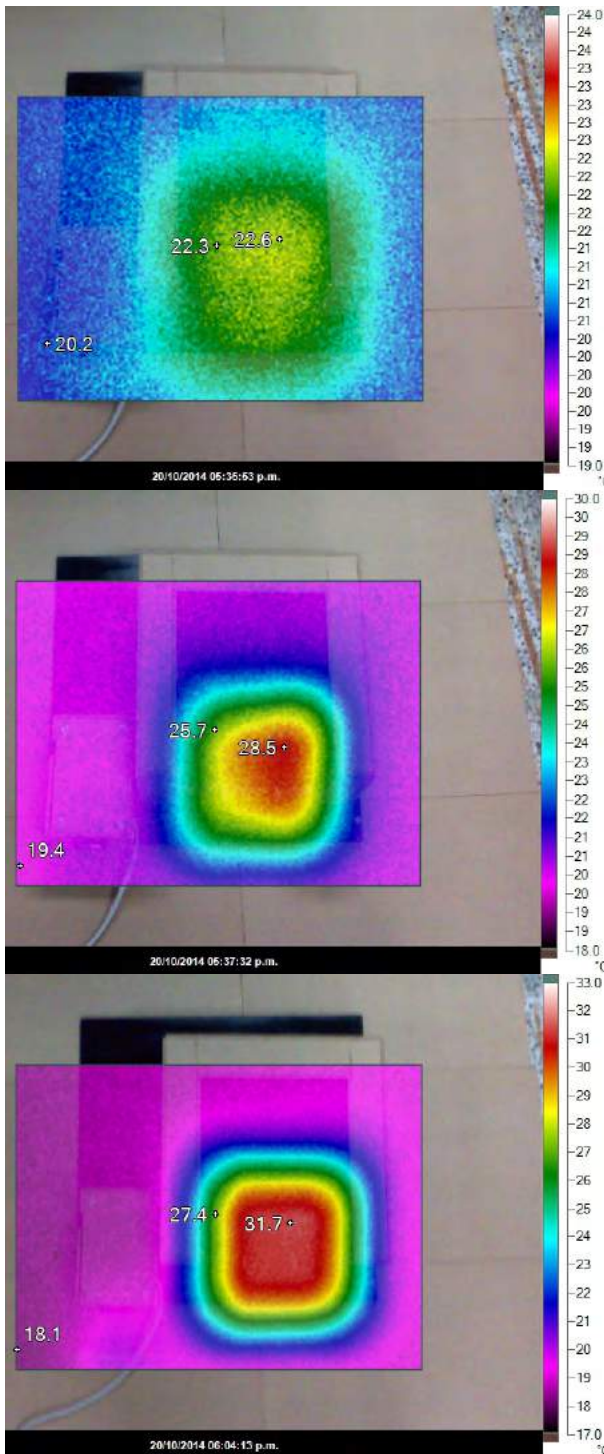
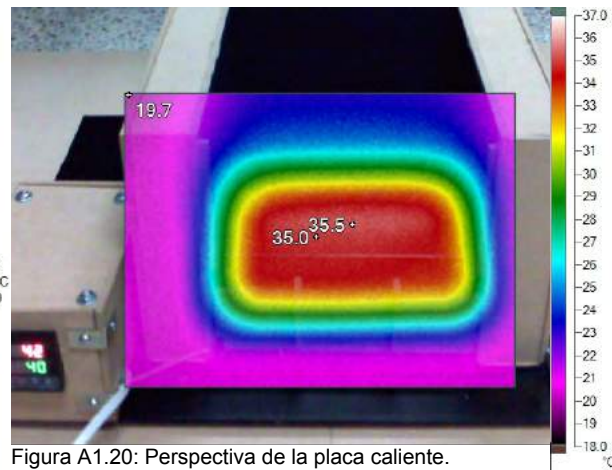
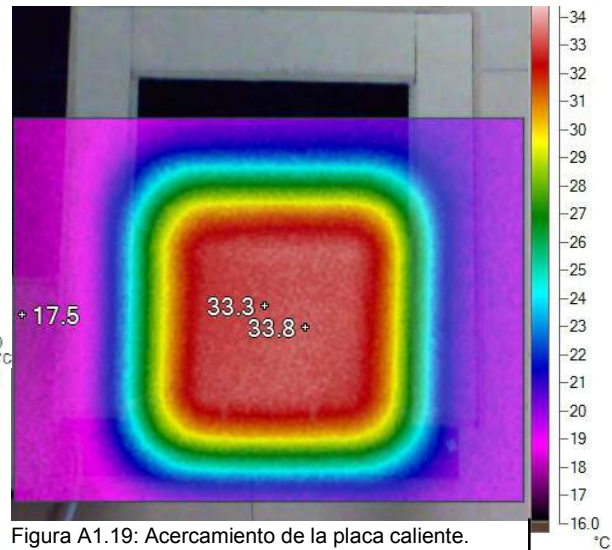


Figura A1.18: Secuencia de la prueba desde el encendido del equipo, con una duración de 0.50 h a 40°C. (Elaboración propia)



Se observa al inicio de la prueba que la placa caliente se encuentra a temperatura ambiente, con forme se calienta la energía se genera desde el lado derecho. Poco después de 5 min. la distribución del calor se extiende de forma homogénea desde el centro hacia los extremos.

Prueba a 50°C durante 0.50 h.

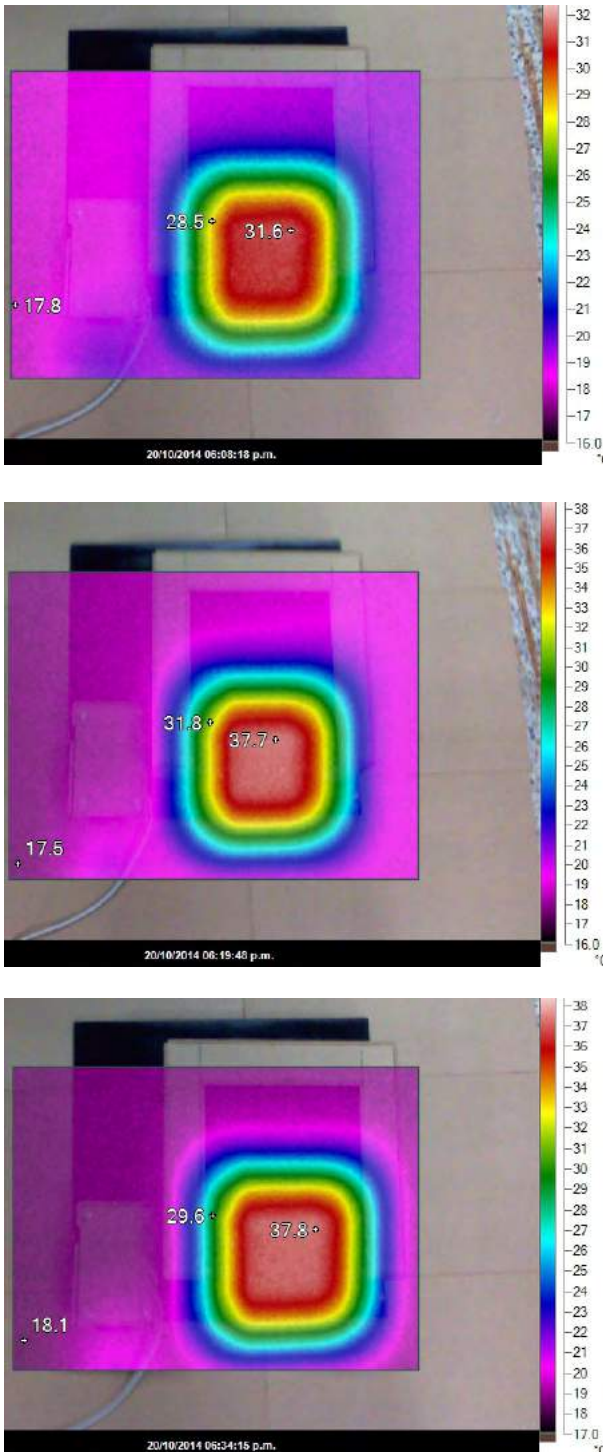


Figura A1.21: Secuencia de la prueba del equipo, con una duración de 0.50 h a 50°C. (Elaboración propia)

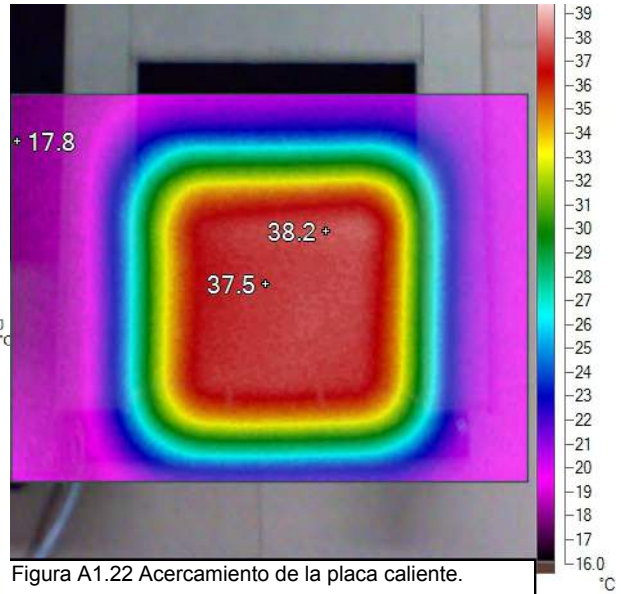


Figura A1.22 Acercamiento de la placa caliente.

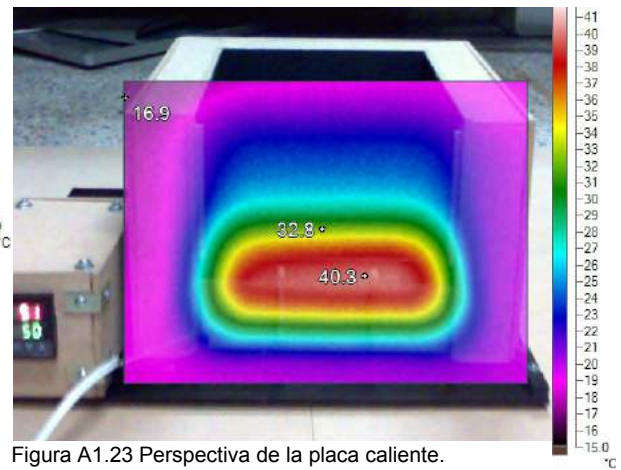


Figura A1.23 Perspectiva de la placa caliente.

Después de 0.50 h se aumentó la temperatura a 50°C, después del cual el patrón de distribución no mostró cambios apreciables. Por otro lado en la perspectiva se aprecia que el equipo no presenta fugas de calor.

Prueba a 60°C durante 0.50 h.

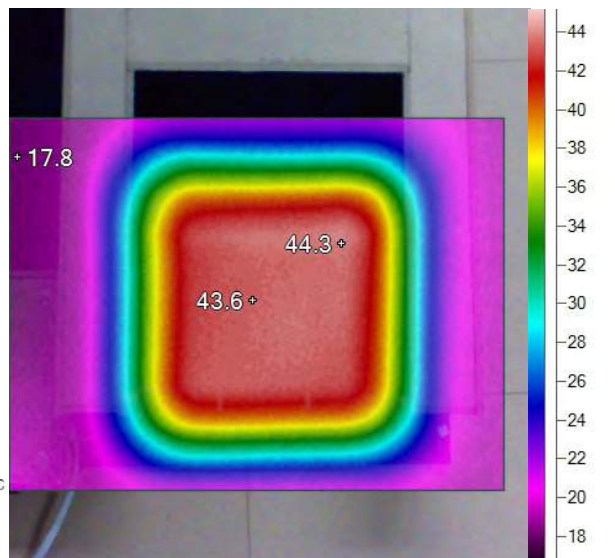
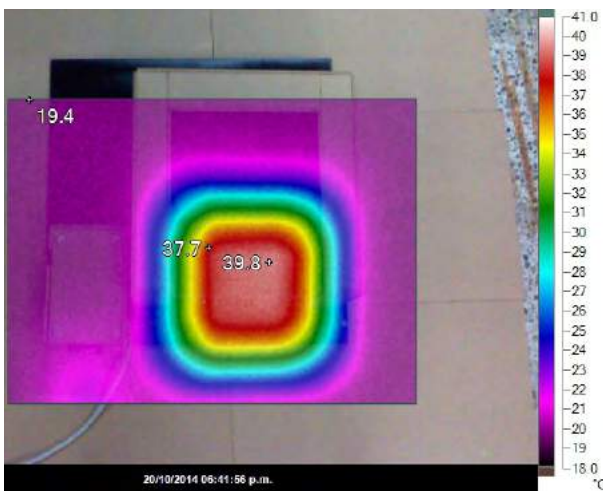


Figura A1.25:Acercamiento de la placa caliente

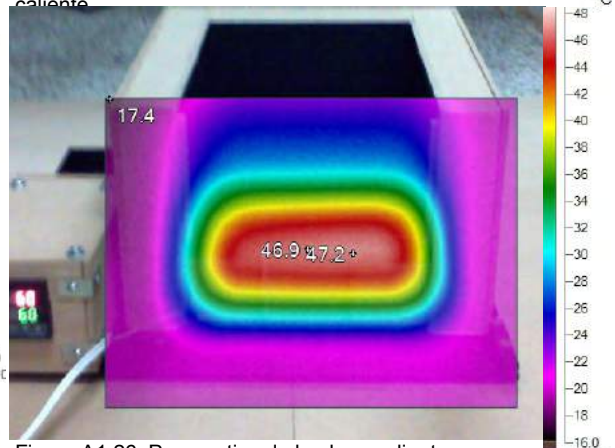
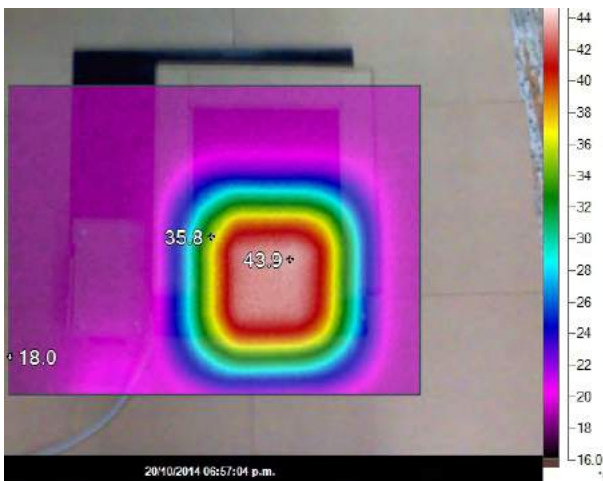


Figura A1.26: Perspectiva de la placa caliente.

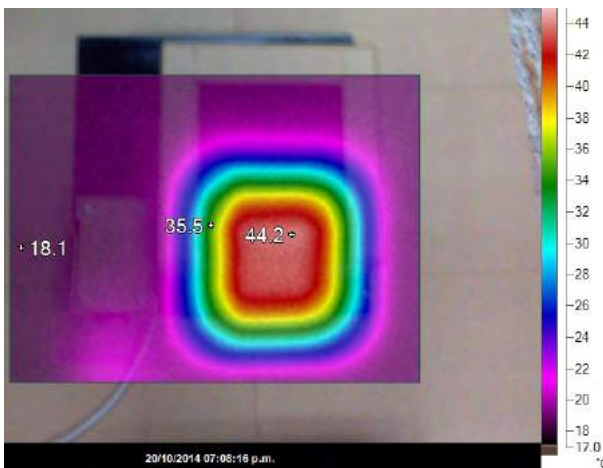


Figura A1.24: Secuencia de la prueba del equipo, con una duración de 0.50 h a 60°C. (Elaboración propia)

Se deduce de las imágenes anteriores que el patrón de distribución de calor sobre la superficie de la placa caliente es homogéneo, dado que la mayoría del área se presenta en el mismo rango de color y que el aumento en la temperatura de operación no modifica el patrón. Por otro lado es de esperarse que en el perímetro exterior de la placa la temperatura vaya en descenso ya que se aleja de la generación de calor por parte de las resistencias eléctricas.

d) Calibración por medio de la medición de un material de conductividad conocida.

La última parte de la calibración se llevó a cabo mediante la medición de un material de conductividad conocida, en este caso se utilizó un tablero de yeso marca TABLAROCA núcleo regular de 0.0127m de espesor, para el cual se reporta una conductividad de 0.1447 W/m[°]K (certificado ONNCCE, 2014).

El objetivo de la prueba es obtener el valor de conductividad térmica de la muestra y definir la técnica de medición más adecuada para el resto de la evaluaciones. Se realizaron 5 pruebas con la técnica propuesta para el equipo de gran formato (Terres, 2015) esta consiste en colocar una doble bolsa de gel congelado en la placa fría y colocar una tapa de poliestireno de 5 cm de espesor, con el fin de limitar el intercambio térmico de las bolsas de gel congelado con la temperatura ambiente y así lograr una temperatura “fría” de mayor duración.

Para este caso se colocaron dentro de la bandeja de aluminio dos bolsas de gel congelado que cubrían toda el área y una doble capa de aislante de fibra mineral misma cantidad que contienen la envoltura de todo el equipo, por último se colocó una placa de poliestireno de 5 cm de espesor.



Figura A1.27: Izquierda, muestra de tablaroca y ubicación de termopares sobre la cara expuesta a la placa fría. Derecha, equipo durante calibración, se observa la tapa aislante. (Elaboración propia)

Para el cálculo de la conductividad térmica λ y la conductancia C se utilizaron las siguientes ecuaciones, derivadas de la ley de Fourier:

$$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \qquad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$$

Ecuación A1.1 y A1.2 para estimar la conductividad térmica λ (W/m[°] C) y la conductancia térmica C (W/m² °C) respectivamente.

Donde:

SIMBOLO		DEFINICIÓN	UNIDADES
λ	=	conductividad térmica	W/(m°C)
C	=	conductancia térmica	W/(m ² °C)
P	=	potencia de la resistencia	W
A	=	área de medición	m ²
L	=	separación entre placas	m
ΔT	=	diferencial de temperatura	°C

El área de medición es la correspondiente al área de la placa caliente 0.20m X 0.20m, la distancia entre placas es la distancia de separación entre la placa caliente y la placa fría, aunque en este caso se consideró que para muestras de pequeño espesor hay que tomar la distancia entre termopares, debido que al ranurar el espacio para embutir el cable del termopar se requieren 6mm (3mm para la cara superior y 3mm para la cara inferior) lo que para un espesor total de 12.7mm resulta en una importante disminución.

El diferencial de temperatura es aquel que se presenta entre la temperatura de la cara expuesta a la placa caliente y la cara expuesta a la placa fría, esto hasta que la muestra presenta un estado estacionario. Según la norma C518 – 10 de ASTM se considera estado estacionario cuando se presentan al menos 5 lecturas consecutivas al menos en un lapso de 10 min y con una variación de hasta el 0.5% del promedio entre ellas, en este caso se tomaron 10 lecturas cada 2 min y con una variación de hasta el 1%(ver en Anexo 3 formato de resultados de cada prueba).

La potencia generada por las resistencias eléctricas, se obtuvo primeramente mediante una medición directa del equipo utilizando un multímetro digital de gancho marca Steren con el que se obtuvo el valor de la intensidad I , la resistencia R, y el voltaje V.

Datos medidos			Datos estimados		
I	4.13	Amperes	P	495.60	Watts
R	29	Ohms	P	494.65	Watts
V	120	Volts	P	496.55	Watts
			Promedio	495.60	Watts

Tabla A1.1: Datos medidos y estimados para la potencia del equipo, a partir de la intensidad, resistencia y Voltaje. Los datos estimados se obtuvieron con las siguientes ecuaciones.

$$P = V \times I \quad P = I^2 \times R \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Ecuación A1.3, A1.4 y A1.5 para estimar la potencia por tres distintos medios.

Sin embargo el control de temperatura del equipo la regula mediante encendidos y apagados constantes por lo que la potencia real de operación fue necesario medirla durante una prueba piloto similar al resto de las pruebas de calibración. Para esto se utilizó un analizador de calidad de energía trifásico marca *AEMC modelo 8335 Power Pad*, el cual se configuró para hacer lecturas cada 5 segundos.

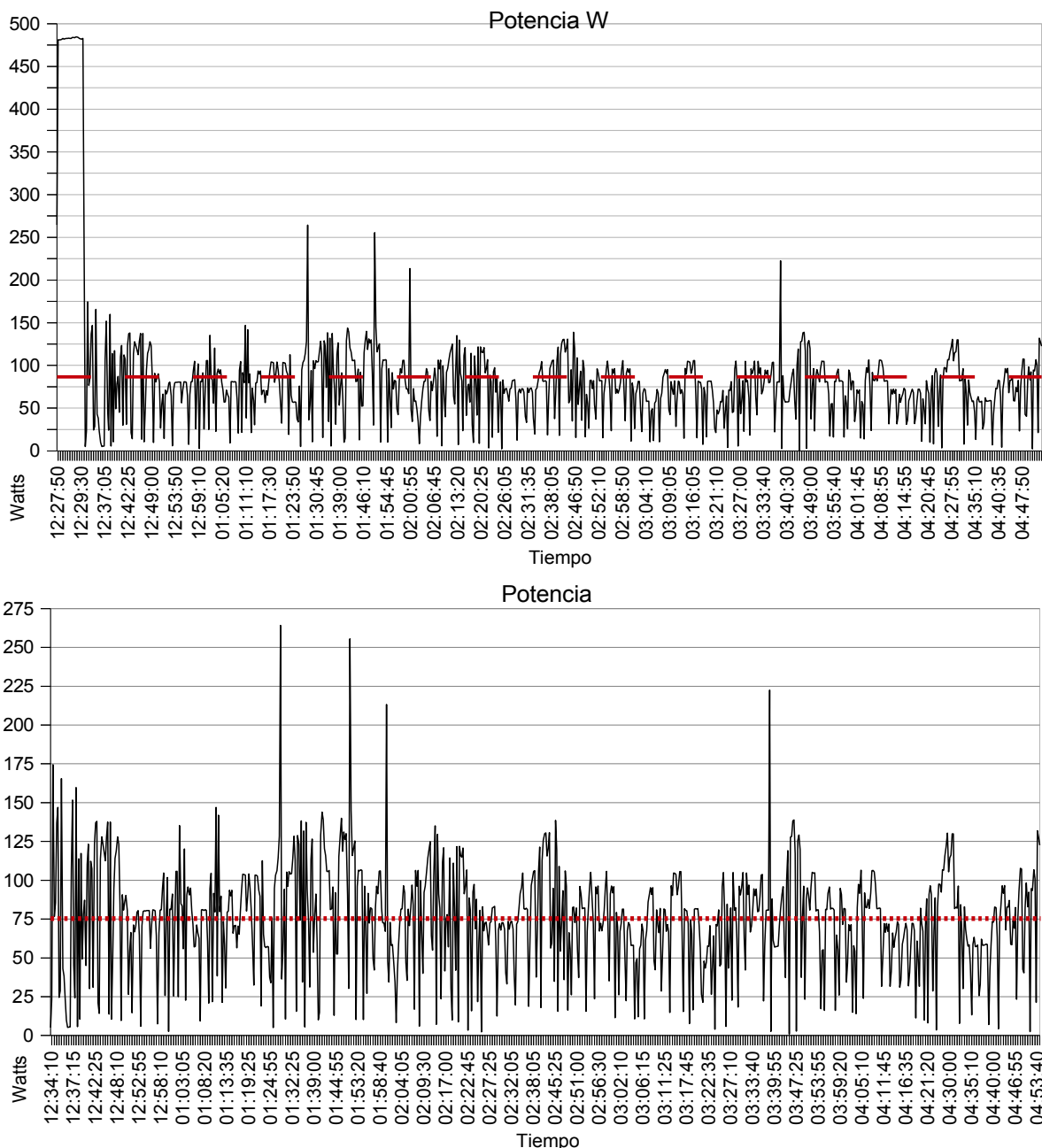


Figura A1.28: Gráficas de potencia del equipo. Se observa en la gráfica superior que al inicio de la prueba la potencia es similar a la estimada anteriormente durante 5 a 6 minutos, este es el tiempo que le toma llegar a 50°C, a partir de ahí la potencia de operación es mucho menor. La potencia media incluyendo el pico de arranque es de 85.44 W, sin embargo este no es un comportamiento típico del equipo. Por lo que se decidió eliminar el pico y determinar la potencia en 75.33 W como lo muestra la gráfica de abajo. (Elaboración propia)

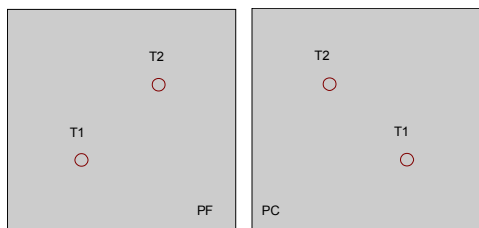


Figura A1.29: Esquema de ubicación de termopares sobre muestra. (Elaboración propia)

A continuación se presenta la prueba número 4/5 como un ejemplo de las pruebas de calibración realizadas con una muestra de tablaroca:



Figura A1.30: Analizador de energía durante prueba piloto para la medición de potencia. (Elaboración propia)

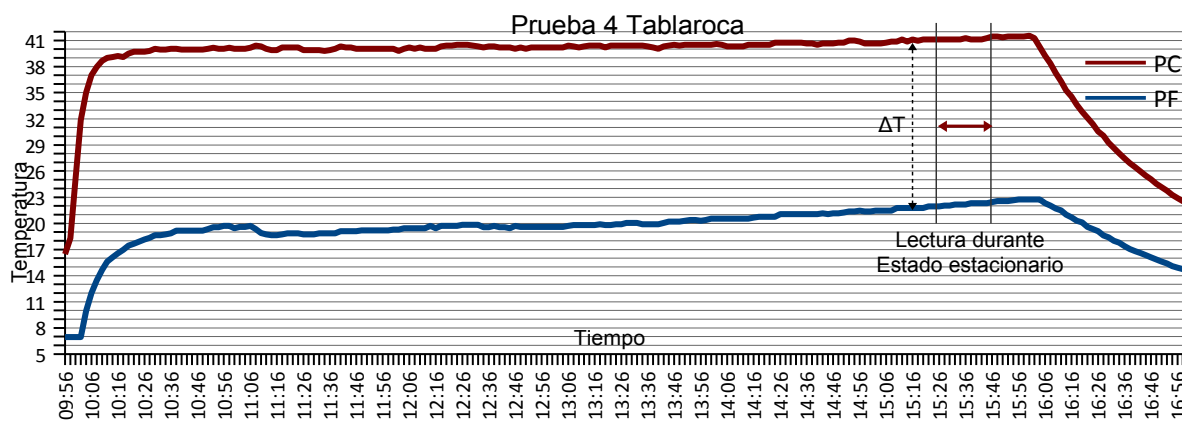


Figura A1.31: Gráfica muestra del comportamiento térmico de un tablaroca durante calibración (técnica 1 – prueba 4). Se observa el lapso de 20 min durante estado estacionario durante la cual se calcula la conductividad térmica a partir de la diferencia de temperatura (ΔT) entre la cara expuesta al calor y aquella expuesta al frío, para la prueba 4, la ΔT fue de 18.98K.

TEMPERATURA % CARAS		
HORA	CALIENTE	FRIA
15:24	41.10	21.95
15:26	41.10	21.95
15:28	41.10	22.05
15:30	41.10	22.05
15:32	41.10	22.15
15:34	41.10	22.15
15:36	41.25	22.15
15:38	41.10	22.30
15:40	41.10	22.30
15:42	41.10	22.30
Δ_t	0.15	0.35
PROMEDIOS	41.12	22.14
Δ_t	18.98	

PORCENTAJE DE VARIACION		
ΔT	λ	Variación
19.15	0.688	0.89%
19.15	0.688	0.89%
19.05	0.692	0.37%
19.05	0.692	0.37%
18.95	0.696	0.15%
18.95	0.696	0.15%
19.10	0.690	0.63%
18.80	0.701	0.95%
18.80	0.701	0.95%
18.80	0.701	0.95%

Σ **0.695** **0.63%**

Tabla A1.2: Datos obtenidos durante la prueba 4 (P4) para el cálculo de conductividad y conductancia térmica. Se observa una variación promedio en la λ menor al 1%. (Elaboración propia)

Por lo tanto:

DATOS DE ENTRADA		
P	=	75.33 W
A	=	0.04 m ²
L	=	0.0070 m
TEMPERATURAS		
PC	=	41.12 °C
PF	=	22.14 °C
ΔT	=	18.98 °C
RESULTADOS		
λ	=	0.695 W/(m°C)
C	=	99.22 W/(m ² °C)

Tabla A1.3: Resultados obtenidos para la prueba muestra 4 de λ y C.

TABLAROCA NÚCLEO REGULAR										
TECNICA 1		RESULTADOS	P1	P2	P3	P4	P5	Promedios	Unidades	Variación
W	0.308	C	108.26	99.12	95.43	99.22	91.13	98.63	W/(m ² °C)	
CON TAPA, DOS BOLSAS DE GEL		λ	0.76	0.69	0.67	0.69	0.64	0.69	W/(m°C)	15.82%
		ΔT	17.40	19.00	19.74	18.98	20.67	19.16	°C	15.82%
Características			6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	5h – 50°C			

Tabla A1.4: Resultados de las 5 pruebas realizadas durante la calibración. C=conductancia, λ=conductividad térmica, ΔT=diferencia de temperatura entre caras. Todas realizadas durante 6 h de encendido del equipo a 50°C, ver en Anexo 3 formato de resultados desglosados de cada prueba. (Elaboración propia)

Los resultados de las 5 pruebas presentan una variación del 15.82% en el valor de λ obtenido entre ellas, esta debido a la misma variación en la ΔT. Esto se atribuye a la técnica utilizada en cuanto al uso de una tapa aislante, por lo que se repitieron las pruebas sin ninguna tapa y con una sola bolsa de gel (Técnica 2), la cual al notarse su descongelado se cambio por una congelada. También se decidió medir el tiempo de descongelado de la bolsa de gel y registrar la temperatura de esta durante la prueba, para esto se encajó un termopar al centro.

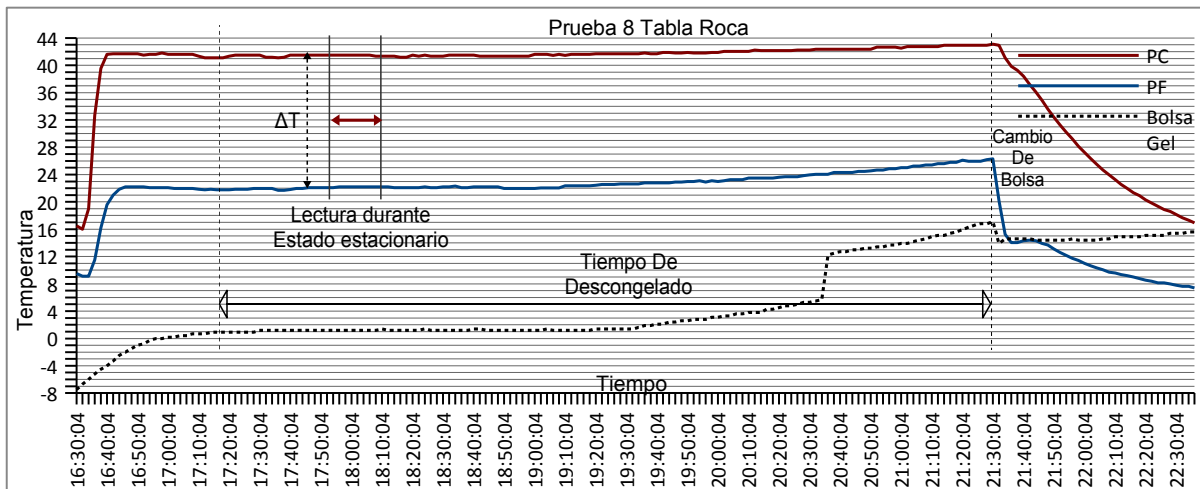


Figura A1.32: Gráfica muestra del comportamiento térmico de un tablaroca durante calibración (técnica 2 – prueba 8), Se observa la temperatura de la bolsa de gel, su tiempo de descongelado y el momento del cambio, la ΔT fue de 19.44K.

TABLAROCA NÚCLEO REGULAR										
TECNICA 2		RESULTADOS	P6	P7	P8	P9	P10	Promedios	Unidades	Variación
W	0.308	C	95.791	96.011	96.875	93.000	96.527	95.641	W/(m ² °C)	
SIN TAPA, UNA SOLA BOLSA DE GEL Y UN CAMBIO		λ	0.671	0.672	0.678	0.651	0.676	0.669	W/(m ² °C)	4.00%
		ΔT	19.660	19.615	19.440	20.250	19.510	19.695	°C	4.00%
		Características	6h – 50°C	1.5h – 50°C	5h – 50°C	5h – 50°C	5h – 50°C			

Tabla A1.5: Resultados de las 5 pruebas realizadas con ajuste en la técnica (Técnica 2). La prueba número 7 de una duración menor se realizó cambiando la bolsa de gel congelada por una bolsa con agua y hielo para ver si se apreciaba un cambio en los resultados, mismo que no ocurrió. (Elaboración propia)

Los resultados de las 5 pruebas presentan una variación del 4.00% en el valor de λ obtenido entre ellas. También se observa que a pesar de que se utilizó una sola bolsa de gel la ΔT promedio aumentó ligeramente en comparación con la técnica anterior que utiliza doble bolsa. Aunque los resultados de λ promedio comparando ambas técnicas variaron solo en un 3.03%, sin embargo la repetibilidad entre pruebas mejoró notablemente, por lo que para el resto de las evaluaciones se aplicara la técnica 2.

Sin embargo también se observa que el resultado de λ promedio obtenido de 0.669 W/m²°C es superior a la reportada por el fabricante de 0.1447 W/m²°C, esto puede deberse al tamaño de la muestra (0.20X0.20m) o a lo reducido de su espesor 0.0127m al cual todavía hay que ranurar para insertar los termopares, obteniendo un espesor real de medición de tan solo 0.007m, según la norma C518 – 10 de ASTM el método se ha utilizado en muestras a partir de 0.025mm.

Dado que las pruebas para la muestra de tablaroca y basalto se realizaron en paralelo, se obtuvieron resultados para ambas metodologías, los resultados muestran un comportamiento similar al tablaroca. Se presentó una variación del 15.38% en el valor de λ obtenido con la Técnica 1 – Muestra 1. Mientras que para la Técnica 2 – Muestra 2 se presentó una variación de 3.44%. El valor de λ obtenido entre la técnica 1 y la 2 es considerable de 36.94%.

BASALTO MUESTRA 1 – TECNICA 1										
MUESTRA 1		RESULTADOS	P1	P2	P3	P4		Promedios	Unidades	Variación
W	1.647	C	238.386	269.807	281.713	275.732		266.409	W/(m ² °C)	
CON TAPA, DOS BOLSAS DE GEL, SIN CAMBIO		λ	3.099	3.507	3.662	3.585		3.463	W/(m ² °C)	15.38%
		ΔT	7.900	6.980	6.685	6.830		7.099	°C	15.38%
		Características	10h – 50°C	17h – 50°C	24h – 50°C	24h – 50°C				

BASALTO MUESTRA 2 – TECNICA 2										
MUESTRA 2		RESULTADOS	P5	P6	P7	P8	P9.M1	Promedios	Unidades	Variación
W	1.735	C	172.222	166.438	167.029	166.291	153.609	167.995	W/(m ² °C)	
SIN TAPA, UNA SOLA BOLSA DE GEL Y UN CAMBIO		λ	2.239	2.164	2.171	2.162	1.997	2.184	W/(m ² °C)	3.44%
		ΔT	10.935	11.315	11.275	11.325	12.260	11.213	°C	3.44%
		Características	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C	6h – 50°C			

Tabla A1.6: Resultados de las 9 pruebas realizadas a 2 muestras de basalto, la Muestra 1 con la Técnica 1 y la Muestra 2 con la Técnica 2. Nótese la prueba número 9, denominada P9.M1 esta se realizó con la Muestra 1 pero con la Técnica 2, para apreciar la variación en los datos obtenidos con ambas técnicas pero con la misma muestra. El promedio obtenido y las variaciones no incluyen en ningún caso la prueba P9.M1. (Elaboración propia)

Dado que se reportan en distintas fuentes, amplias variaciones en las propiedades termofísicas de las rocas (Ver Tabla 9.22 en capítulo 6), incluyendo el basalto, puede atribuirse la variación obtenida (36.94%) a que son dos muestras distintas y no a que se obtuvo con técnicas diferentes. Para apreciar esto se realizó la prueba P9.M1, la cual se hizo con la Muestra 1, pero con la Técnica 2. Como se presenta en la tabla anterior el valor de λ es de $1.997\text{W/m}^\circ\text{C}$ mientras que el valor promedio para la misma muestra obtenido con la Técnica 1 es de $3.463\text{W/m}^\circ\text{C}$, una variación del 42.34% esto debido a un aumento en la ΔT promedio.

Lo anterior se atribuye a la diferencia entre técnicas, el uso de una tapa aislante impide que el calor generado se disipe, al retirarla se presenta un aumento en la diferencia de temperatura (ΔT) de la cara expuesta a la placa caliente y la cara expuesta a la placa fría. Por lo que se da por válido el dato de λ promedio de $2.184\text{W/m}^\circ\text{C}$ y a la Técnica 2.

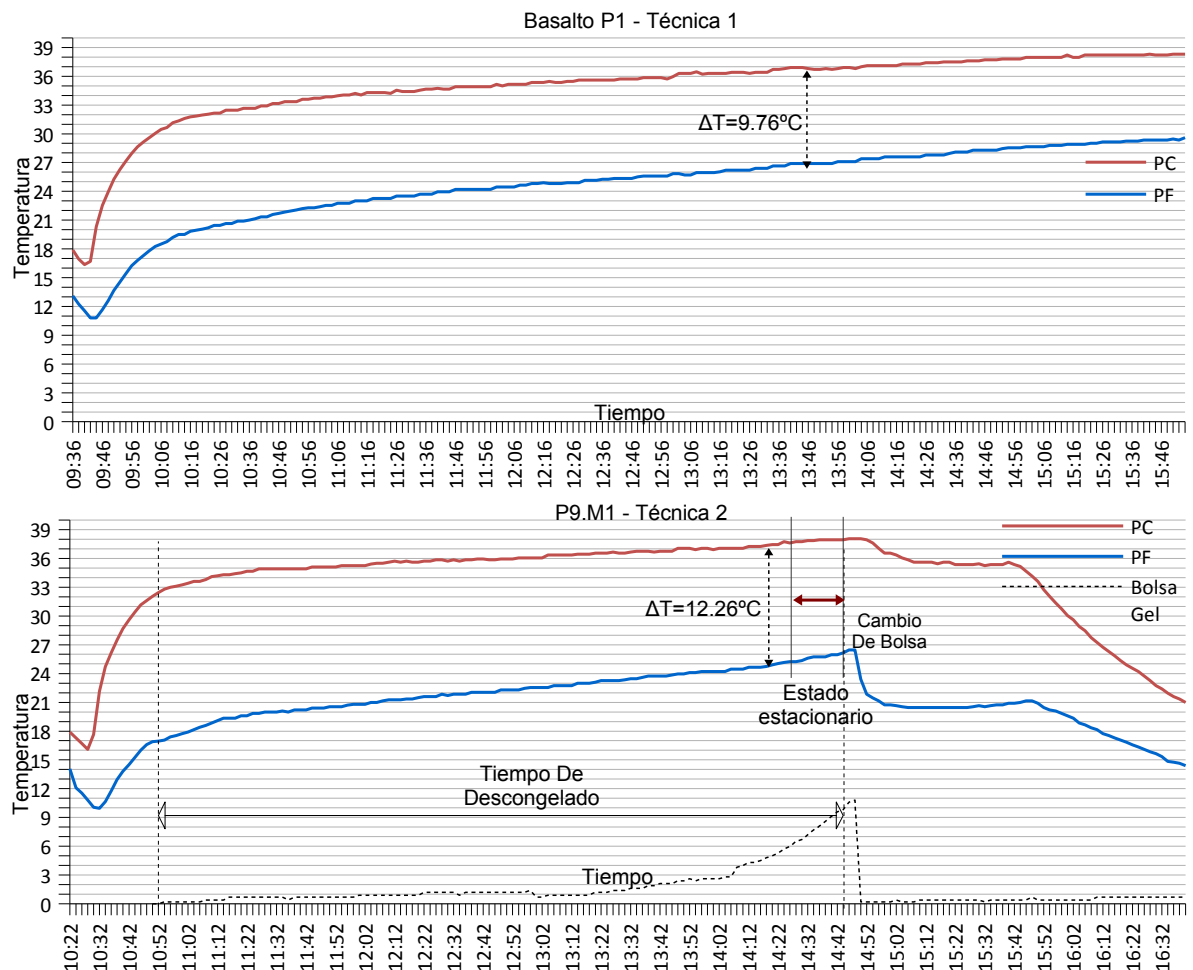


Figura A1.33: Comparativo del comportamiento térmico para la misma muestra con dos técnicas diferentes. Nótese que a pesar que estas pruebas tuvieron duración distinta, el aumento en ΔT se toma después de transcurrido el mismo tiempo de haber encendido el equipo (3:56min).

III. Generar muestras de material base.

El objetivo de generar las muestras de estudio es darles las características necesarias para que se ajusten lo mejor posible al equipo. Para esto es necesario que tengan la forma y dimensiones de la placa caliente, y que la cara superior e inferior sean paralelas entre sí para asegurar que el flujo de calor sea perpendicular a la muestra.

Se seleccionaron tres rocas que tuvieran al menos una de sus caras lo más plana posible, del mayor tamaño tanto en largo y ancho como en espesor. Ya que es necesario recortar y pulir las muestras hasta que se alcance una pieza de forma similar a una loseta de aproximadamente 1" de espesor.

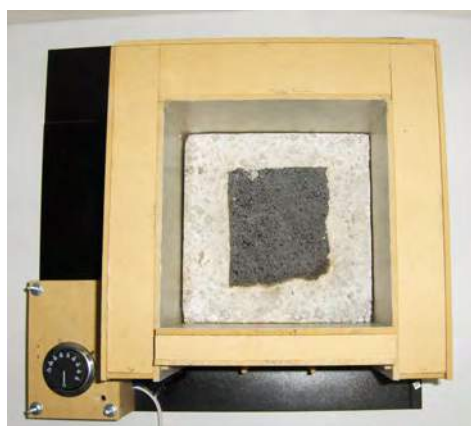


Figura A1.34: Muestra de estudio dentro del equipo. (Elaboración propia)



Figura A1.35: Secuencia de la producción de las muestras de estudio. (Elaboración propia)

Una vez recortadas y pulidas las rocas, se procedió a colar una máscara de un material con conductividad térmica similar (C518 – 10 de ASTM). Según la NOM 008 ENER 2001 la conductividad térmica del basalto es de 2.5 W/m^oK y el concreto tiene 1.74 W/m^oK, por lo que se decidió colocar una máscara de este último que permitiera ajustar cada muestra al tamaño de la placa caliente. Por último se ranuraron los espacios necesarios para los termopares.

Concreto de 150Kg/cm² / 1 m³

Concepto	Botes 19L	Lts
Cemento	1	50
Arena	5.5	104.5
Grava	6.5	123.5
Agua	2.5	47.5

Tabla A1.7: Proporciones utilizadas para máscara de concreto. Fuente: Holcim.com.mx

Anexo 2 - Manual de operación recomendada.

- I. Medidas recomendadas de las muestras de estudio.
- II. Establecer los puntos de medición para ubicar los termopares.
- III. Ranurado para colocación de termopares.
- IV. Fijación de los termopares a la muestra de estudio.
- V. Conexión de los termopares a los módulos Adam.
- VI. Colocación de la muestra dentro del equipo.
- VII. Ejecución de la prueba experimental.

I. Las muestras de estudio deben ajustar lo mejor posible al interior del equipo, tratando de cubrir el área total de la placa, cuando no es posible, la muestra al menos debe cubrir el área de medición y el resto del área debe quedar cubierto con una máscara de un material con conductividad térmica similar (C518 – 10 de ASTM). Ya que las partes que no estén cubiertas presentarán fugas de calor lo cual producirá menor certeza en los datos a obtener.

Para esto se recomienda hacer un molde de la placa caliente para compararlo con todas las muestras antes de montar. Si es necesario se deberá lijar, rebajar o pulir las muestras de estudio hasta que ajusten y asienten lo mejor posible, teniendo en cuenta que también será necesario prever una holgura para que el espécimen pueda ser retirado sin dañarse o dañar el equipo.

II. Una vez que se ha asegurado que la muestra ajusta lo mejor posible en el equipo, es necesario establecer los puntos de medición donde se ubicarán los termopares. Para esto se recomienda establecer en un diagrama con medidas los puntos donde se ubicarán los termopares tanto en la placa caliente como en la placa fría. Ya que el procedimiento está diseñado para hacer una medición paralela y unidireccional del flujo de calor es necesario asegurar que los puntos de la placa caliente se encuentran alineados con los de la placa fría.

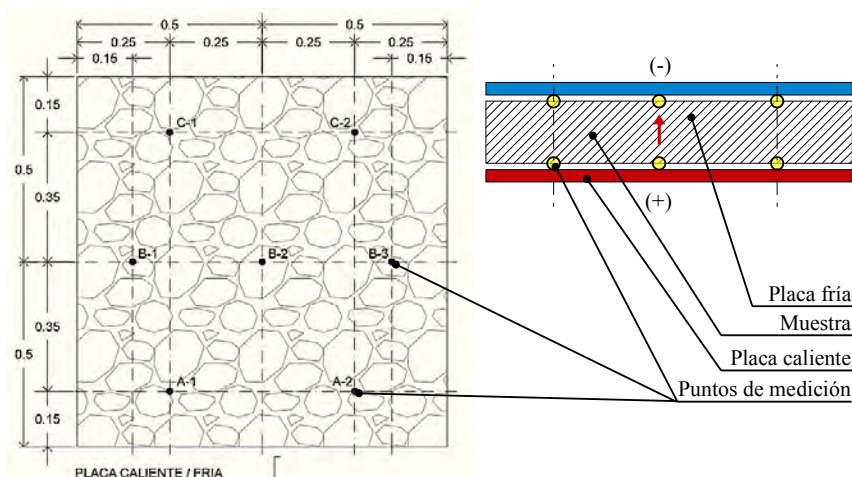


Figura A2.1: Diagrama ejemplo de puntos de medición. (Elaboración propia)

III. Se requiere ranurar la muestra de estudio para ubicar los termopares en los puntos designados tanto en la cara que está en contacto con la placa caliente como con la placa fría. Para esto no solo se considera la punta del termopar sino también el recorrido del cable hasta el frente del equipo donde deberán conectarse..

Se recomienda revisar la profundidad de las ranuras para que el cable quede embebido en la muestra y esta última asiente perfectamente tanto con la placa caliente como con la placa fría, de otro modo podría existir una pequeña capa de aire que alterará los resultados.



Figura A2.2: Ejemplo de ranurado de muestras para ubicación de termopares. (Elaboración propia)

Por otro lado si la muestra de estudio es de un espesor muy pequeño como muchos de los paneles divisorios comunes en la construcción, se recomienda que las ranuras por donde viaja el cable no coincidan entre ambas caras de la muestra para no debilitarla de tal forma que pueda fracturarse, recordando que la punta de cada uno de los termopares sí debe coincidir en los puntos de medición establecidos con anterioridad. Si es necesario se recomienda remover uno de los dos forros del cable del termopar para no tener que ranurar a mayor profundidad la muestra.

IV. Para asegurarse que los termopares se encuentran en contacto con la superficie de la muestra es necesario fijarlos, por lo que una vez colocados dentro de la ranura previamente realizada se recomienda rellenar el área que ocupa la punta del termopar con una pequeña cantidad del mismo material a medir (aplanado de cemento, yeso, polvo de tabique, etc), si no es posible dadas las características del material puede rellenarse con grasa disipadora de calor, producto comercial usualmente en existencia en tiendas de electrónica.

El recorrido del cable dentro de las ranuras también es necesario fijarlo para evitar que se desplace, por lo que se recomienda colocar cinta adhesiva o incluso grapas si la cinta no presenta la suficiente adhesión. Procurando que sean de dimensiones pequeñas ya que el material metálico genera puentes térmicos que modifican los flujos de calor, por lo que hay que evitar clavos, tornillos o cualquier otro método de fijación ajeno al sistema constructivo a estudiar y que genere puentes térmicos.

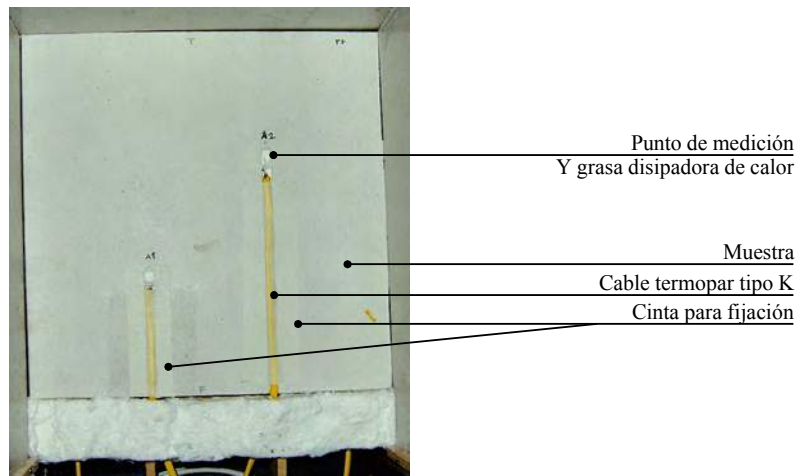


Figura A2.3: Ejemplo de fijación de termopares. (Elaboración propia)

V. La conexión de los termopares a los módulos Adam debe realizarse identificando aquellos que están ubicados sobre la cara en contacto con la placa caliente y los correspondientes a la placa fría, para ubicarlos con facilidad en la hoja de cálculo generada por el software *LabVIEW*. Para esto se recomienda colocar indicadores en cada uno de los cables.

VI. La colocación de la muestra al interior del equipo debe realizarse teniendo cuidado de mantener la ubicación de los termopares y asegurándose que la muestra asienta perfectamente sobre ambas placas para evitar la existencia de aire atrapado.

Una vez asentada la muestra de estudio se procede a colocar la placa fría sobre la muestra, se recomienda colocar una sola bolsa de gel refrigerante hasta que se encuentre completamente congeladas, lo que asegura que la placa fría se mantenga a una temperatura estable por mayor tiempo. La bolsa de gel refrigerante, debe cubrir toda el área de la placa, sin dejar espacios libres. También es recomendable colocarla al interior de la bandeja dentro de una bolsa plástica que permite reducir escurrimientos fuera de la bandeja

Se observó durante varias pruebas que para la evaluación de conductividad térmica, a la placa fría no debe colocársele ninguna tapa aislante, para no obstruir el flujo de calor. Mientras que para la evaluación del calor específico se remueve la placa fría y todos sus componentes y sí se coloca una tapa aislante.

VII. Para iniciar la prueba experimental se recomienda mantener el pirómetro a una temperatura de 20°C es decir cercana a la temperatura ambiente, con esto se asegura que el equipo no genere un pico de temperatura súbito. Una vez transcurridos un par de minutos de iniciada la prueba es posible aumentar la temperatura del pirómetro a la temperatura deseada para la medición. Una vez terminada la prueba y justo antes de apagar el equipo se ajusta el pirómetro una vez más a temperatura ambiente para la siguiente prueba.

La duración de la prueba depende del tiempo que tarden la placa caliente y la placa fría en presentar una temperatura estable, este tiempo varía según la muestra de estudio que se coloca entre ambas placas. También depende de la cantidad de lecturas que se deseen obtener durante la operación en estado permanente, según la norma C518 – 10 de ASTM se requieren al menos 5 lecturas en un lapso de 10 min y con una variación de hasta el 5% del promedio entre ellas, aunque a mayor número de lecturas se pueden obtener promedios más acertados. Por lo que es necesario realizar pruebas piloto y establecer los tiempos requeridos de cada muestra.

El equipo se recomienda usar a temperaturas menores a los 100°C, ya que está diseñado para evaluar la transmisión térmica en elementos arquitectónicos, como el flujo de calor proveniente de la radiación solar o la temperatura del aire exterior. Donde no se presentan temperaturas mayores a los 50° o 60°C. El uso a temperaturas mayores a los 100°C por varias horas, producirá un envejecimiento acelerado en las partes del conductímetro.

VII. Material requerido.

Para realizar las pruebas aquí descritas además de las muestras de estudio se requieren los siguientes elementos.

- a) Termopares tipo “K” con cable tipo KX20 SOLID PVC/PVC soldados en un extremo. Estos deberán ser tantos como se requieran para medir cada uno de los puntos sobre las caras expuestas a la placa caliente o fría.
- b) Tubo con grasa disipadora de calor, en este caso se utilizó la marca Steren LIM-TER de 28 gr.
- c) Módulos adquirentes de datos para conexión de termopares, en este caso se utilizaron dos de la marca ADAM 40-18 Y 40-18M de 16 bit y 8 canales.
- d) Bolsas de gel refrigerante, suficientes para ocupar toda el área de la placa fría en doble capa. En este caso se utilizaron de la marca SYNGEL.
- e) Doble tapa aislante para cubrir la totalidad de la muestra, únicamente para la evaluación de calor específico, en este caso se utilizaron dos capas de fibra mineral de 1” de espesor c/u.
- f) Equipo de cómputo con software *LabVIEW* para adquirir los datos de los módulos ADAM.

VIII. Mejoras sugeridas al equipo.

Como parte de las conclusiones se sugieren los siguientes ajustes que pudieran mejorar las mediciones a realizar y reducir los tiempos de trabajo.

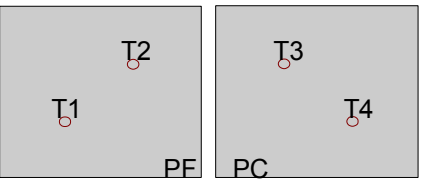
a) La sustitución de la placa fría aquí descrita por un equipo de enfriamiento automático es probablemente el ajuste más relevante al equipo. Ya que el constante descongelamiento de las bolsas de gel debido al intercambio de calor con la placa caliente y con el ambiente reduce los tiempos en que se considera que la muestra se expuso a un estado estacionario.

Por otro lado el tiempo de congelación de las bolsas de gel es de 1 día aproximadamente lo que aumenta los tiempos totales de experimentación.

b) La placa caliente del equipo esta formada por la placa de acero y dos resistencias provenientes de planchas eléctricas de tipo comercial, conectadas en serie, sin embargo sería recomendable sustituirlas por una sola resistencia eléctrica que pueda recorrer la placa de acero de forma que asegure una distribución homogénea del calor.

c) El desarrollo de una aplicación u hoja de cálculo que permita promediar los datos obtenidos en las mediciones, la generación de gráficas y resultados de conductividad, conductancia, resistencia térmica, entre otras, de forma automática sería una interesante mejora.

Anexo 3 – Formatos desglosados de análisis térmico para muestras de tablaroca y basalto.

1. DATOS DE PRUEBA				INTERVALO DE MEDICIÓN @				2		min		ESQUEMA DE TERMOPARES																																				
MUESTRA A EVALUAR				Tablaroca núcleo regular 12mm				No.		P3		TECNICA 1																																				
FECHA				del 27 al 27				MÉS		AÑO																																						
DURACIÓN				12:00																																												
INICIO				12:00				hr		Jueves/27/Noviembre/2014																																						
ENCENDIDO P. CALIENTE				12:20				hr		Jueves/27/Noviembre/2014																																						
APAGADO P. CALIENTE				18:36				hr		Jueves/27/Noviembre/2014																																						
TERMINO				00:00				hr		Jueves/27/Noviembre/2014																																						
2. MEDICIONES				ESTADO PERMANENTE								4. TEMPERATURA % CARAS																																				
INTERVALO				13:52 a 14:20				hr		JUEVES/27/NOV		<table border="1"> <thead> <tr> <th>HORA</th> <th>CALIENTE</th> <th>FRIÁ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>14:02</td><td>40.85</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:04</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:06</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:08</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:10</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:12</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:14</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:16</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:18</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> <tr><td>14:20</td><td>41.00</td><td>21.25</td></tr> </tbody> </table>				HORA	CALIENTE	FRIÁ	14:02	40.85	21.25	14:04	41.00	21.25	14:06	41.00	21.25	14:08	41.00	21.25	14:10	41.00	21.25	14:12	41.00	21.25	14:14	41.00	21.25	14:16	41.00	21.25	14:18	41.00	21.25	14:20	41.00	21.25
HORA	CALIENTE	FRIÁ																																														
14:02	40.85	21.25																																														
14:04	41.00	21.25																																														
14:06	41.00	21.25																																														
14:08	41.00	21.25																																														
14:10	41.00	21.25																																														
14:12	41.00	21.25																																														
14:14	41.00	21.25																																														
14:16	41.00	21.25																																														
14:18	41.00	21.25																																														
14:20	41.00	21.25																																														
DURACIÓN				00:28:00				min																																								
3. CALCULOS				ECUACIONES				SIMBOLO		DEFINICIÓN		UNIDADES																																				
				$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \quad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$																																												
DATOS DE ENTRADA				P = 75.33 W A = 0.04 m ² L = 0.0070 m																																												
Σ TEMPERATURAS % CARAS				PC = 40.985 °C PF = 21.250 °C ΔT = 19.735 °C																																												
				5. RESULTADOS																																												
				λ = 0.668 W/m °C																																												
				C = 95.43 W/m ² °C																																												
				Δ _i = 0.15																																												
				Σ = 40.985																																												
				Δ _t = 19.735																																												

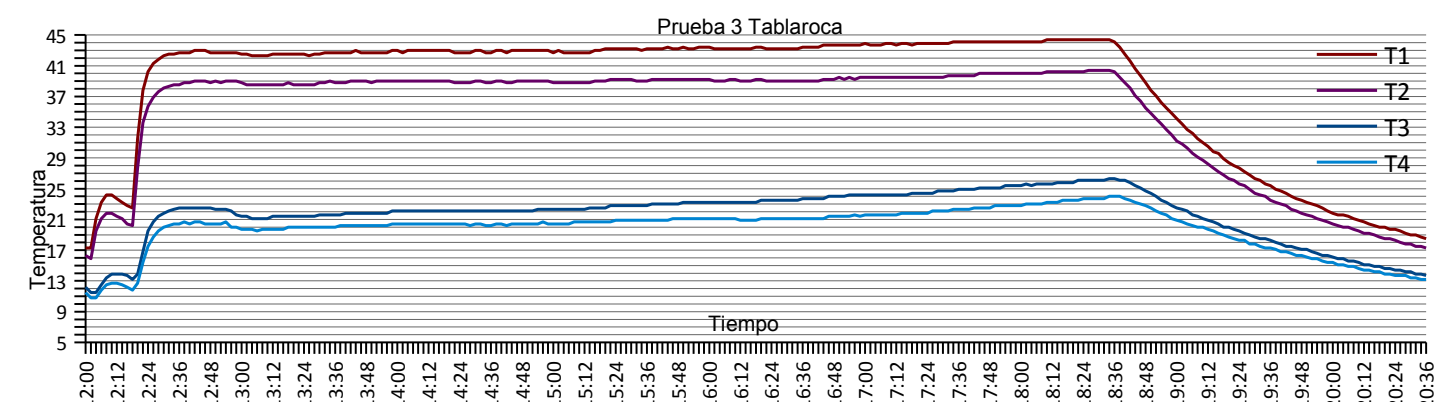
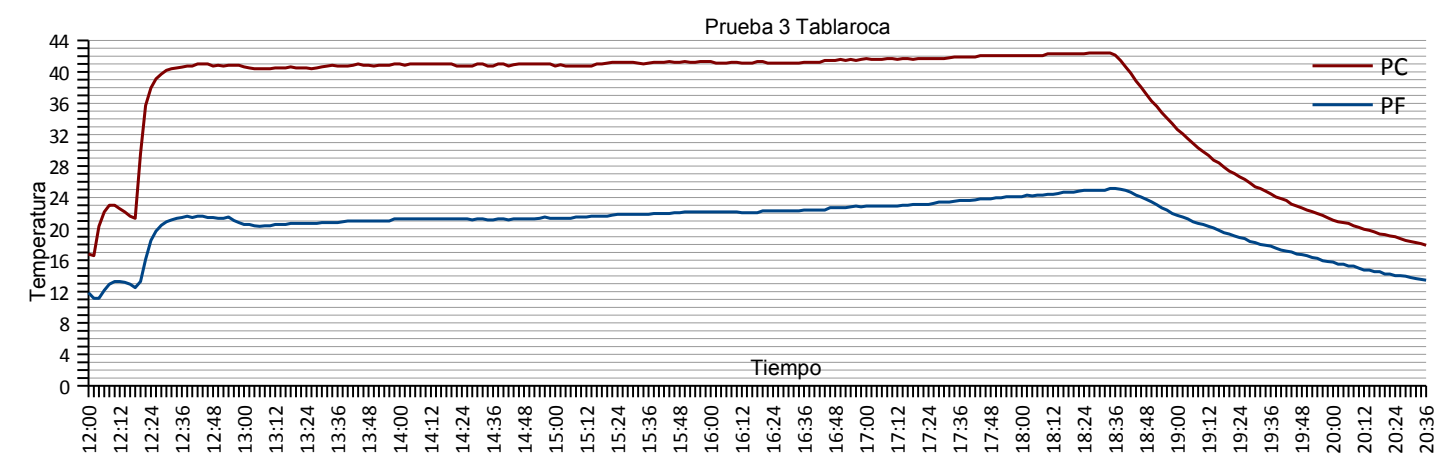
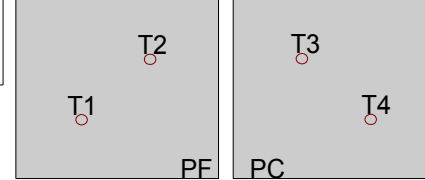


Figura A3.1: Formato desglosado para la prueba 3 – técnica 1, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar. (Elaboración propia)

1. DATOS DE PRUEBA				INTERVALO DE MEDICIÓN @				2		min		ESQUEMA DE TERMOPARES																																				
MUESTRA A EVALUAR				Tablaroca núcleo regular 12mm				No.		P9		TECNICA 2																																				
FECHA				del 7 al 7				MÉS		AÑO																																						
DURACIÓN				06:42				h:m:s																																								
INICIO				11:10				hr		Miércoles/07/Enero/2015																																						
ENCENDIDO P. CALIENTE				11:16				hr		Miércoles/07/Enero/2015																																						
APAGADO P. CALIENTE				16:52				hr		Miércoles/07/Enero/2015																																						
TERMINO				17:52				hr		Miércoles/07/Enero/2015																																						
2. MEDICIONES				ESTADO PERMANENTE								4. TEMPERATURA % CARAS																																				
INTERVALO				13:24 a 13:58				hr		Miércoles/07/Enero		<table border="1"> <thead> <tr> <th>HORA</th> <th>CALIENTE</th> <th>FRIÁ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>13:40</td><td>40.75</td><td>20.20</td></tr> <tr><td>13:42</td><td>40.75</td><td>20.20</td></tr> <tr><td>13:44</td><td>40.65</td><td>20.20</td></tr> <tr><td>13:46</td><td>40.65</td><td>20.45</td></tr> <tr><td>13:48</td><td>40.55</td><td>20.30</td></tr> <tr><td>13:50</td><td>40.55</td><td>20.45</td></tr> <tr><td>13:52</td><td>40.55</td><td>20.45</td></tr> <tr><td>13:54</td><td>40.55</td><td>20.45</td></tr> <tr><td>13:56</td><td>40.65</td><td>20.55</td></tr> <tr><td>13:58</td><td>40.75</td><td>20.65</td></tr> </tbody> </table>				HORA	CALIENTE	FRIÁ	13:40	40.75	20.20	13:42	40.75	20.20	13:44	40.65	20.20	13:46	40.65	20.45	13:48	40.55	20.30	13:50	40.55	20.45	13:52	40.55	20.45	13:54	40.55	20.45	13:56	40.65	20.55	13:58	40.75	20.65
HORA	CALIENTE	FRIÁ																																														
13:40	40.75	20.20																																														
13:42	40.75	20.20																																														
13:44	40.65	20.20																																														
13:46	40.65	20.45																																														
13:48	40.55	20.30																																														
13:50	40.55	20.45																																														
13:52	40.55	20.45																																														
13:54	40.55	20.45																																														
13:56	40.65	20.55																																														
13:58	40.75	20.65																																														
DURACIÓN				00:34:00				min																																								
3. CALCULOS				ECUACIONES				SIMBOLO		DEFINICIÓN		UNIDADES																																				
				$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \quad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$																																												
DATOS DE ENTRADA				P = 75.33 W A = 0.04 m ² L = 0.0070 m																																												
Σ TEMPERATURAS % CARAS				PC = 40.64 °C PF = 20.39 °C ΔT = 20.25 °C																																												
				5. RESULTADOS																																												
				λ = 0.651 W/m °C																																												
				C = 93.000 W/m ² °C																																												
				Δ _i = 0.2																																												
				Σ = 40.64																																												
				Δ _t = 20.25																																												

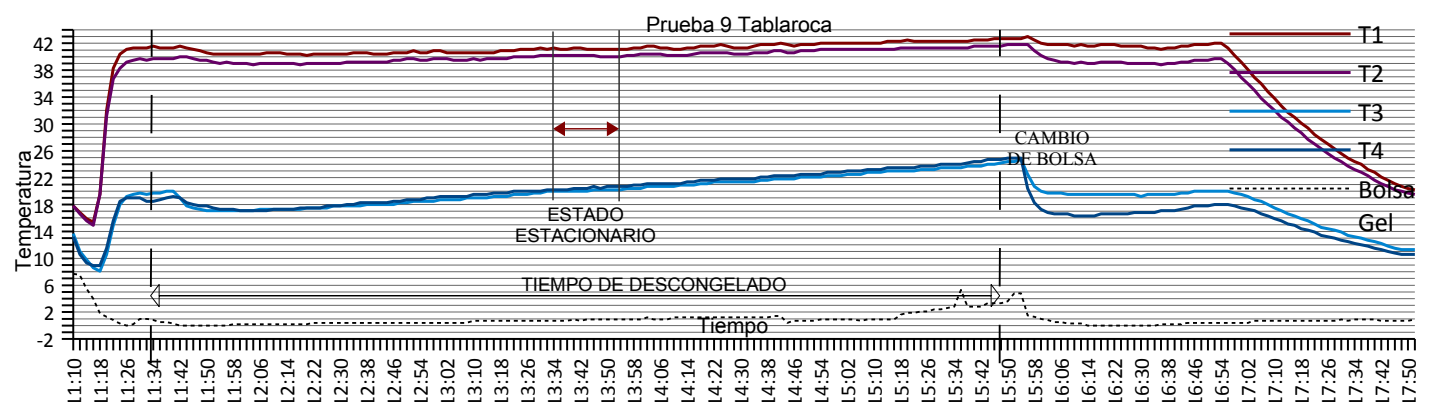
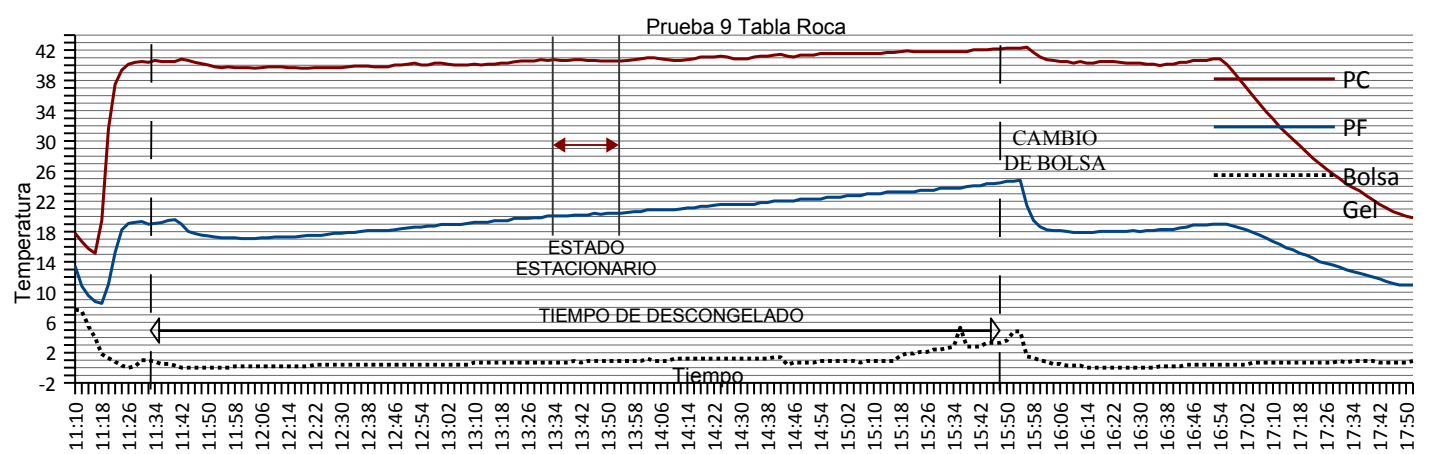


Figura A3.2: Formato desglosado para la prueba 9 – técnica 2, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar. (Elaboración propia)

1. DATOS DE PRUEBA					INTERVALO DE MEDICIÓN @			2		min		ESQUEMA DE TERMOPARES		
MUESTRA A EVALUAR	Roca basalto 25mm			No.	P3		TECNICA 1							
FECHA	del	DIAS	MES	AÑO										
DURACIÓN	36:00:00			h:m:s										
INICIO	18:20:02	hr	Martes/09/Diciembre/2014											
ENCENDIDO P. CALIENTE	18:26:02	hr	Martes/09/Diciembre/2014											
APAGADO P. CALIENTE	18:26:02	hr	Miércoles/10/Diciembre/2014											
TERMINO	06:26:02	hr	Miércoles/10/Diciembre/2014											
2. MEDICIONES					ESTADO PERMANENTE			4. TEMPERATURA % CARAS						
INTERVALO	11:42:02	a	12:32:02	hr	Miércoles/10/Diciembre		HORA	CALIENTE	FRIÁ					
DURACIÓN	00:50:00			min					11:46:02	41.55	34.75			
3. CALCULOS ECUACIONES SIMBOLO DEFINICIÓN UNIDADES $\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \quad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$					λ conductividad térmica W/m °C C conductancia térmica W/m² °C P potencia de la resistencia W A área de medición m² L separación entre placas m ΔT diferencial de temperatura K			11:48:02	41.55	34.90				
								11:50:02	41.55	34.90				
DATOS DE ENTRADA P = 75.33 W A = 0.04 m² L = 0.0130 m					λ = P × (L / (A × Δt)) C = P / (A × Δt)			11:52:02	41.55	34.90				
								11:54:02	41.55	34.90				
Σ TEMPERATURAS % CARAS PC = 41.55 °C PF = 34.87 °C ΔT = 6.69 °C					DATOS DE ENTRADA P = 75.33 W A = 0.04 m² L = 0.0130 m			11:56:02	41.55	34.90				
								11:58:02	41.55	35.00				
5. RESULTADOS λ 3.6623 W/m °C C 281.71 W/m² °C					Σ TEMPERATURAS % CARAS PC = 38.23 °C PF = 26.95 °C ΔT = 11.28 °C			12:00:02	41.55	34.90	Δ ₁	0	0.25	
								Δ ₁	0	0.25	Σ	41.55	34.865	Δ ₁

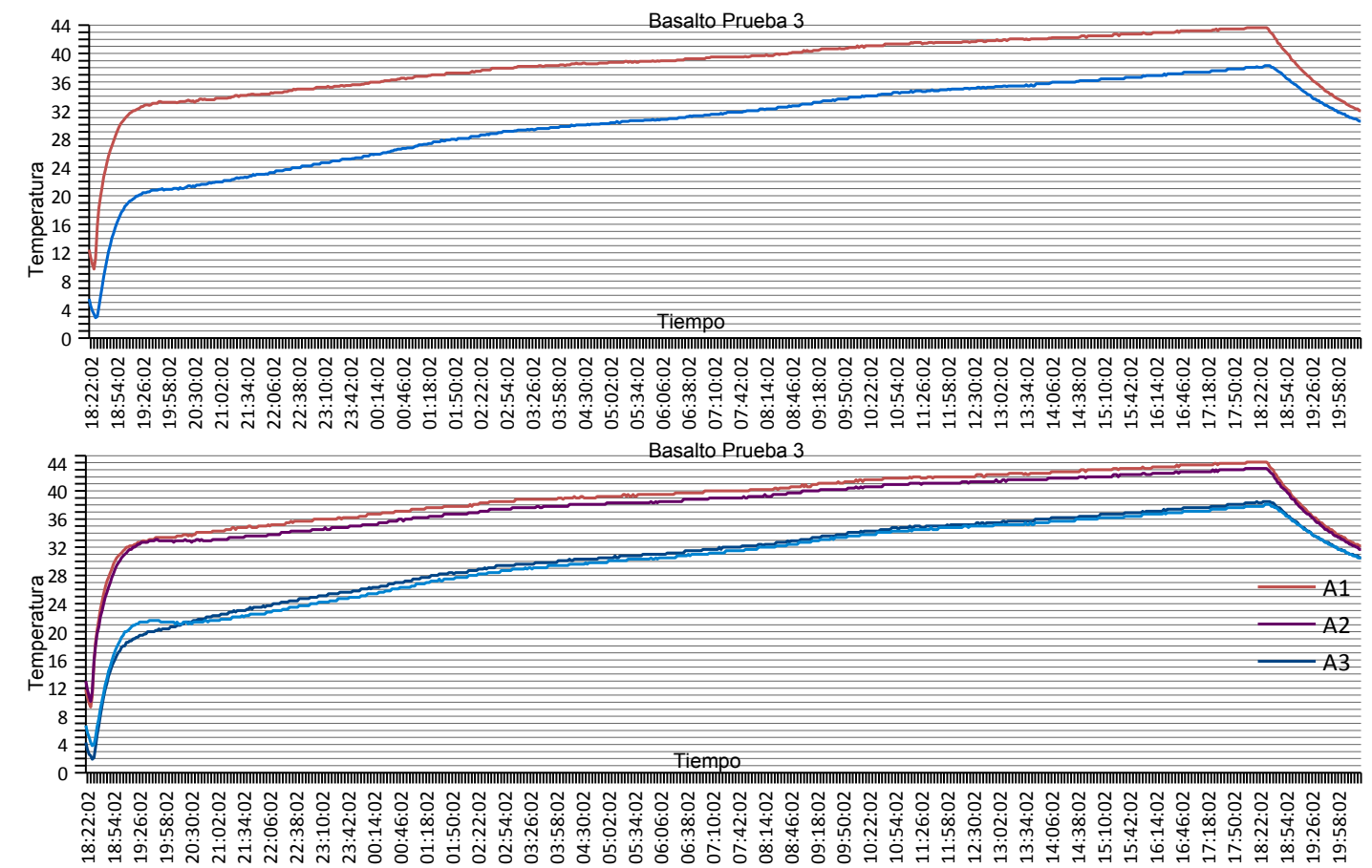


Figura A3.3: Formato desglosado para la prueba 3 – técnica 1, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar. (Elaboración propia)

1. DATOS DE PRUEBA					INTERVALO DE MEDICIÓN @			2		min		ESQUEMA DE TERMOPARES		
MUESTRA A EVALUAR	Roca basalto 25mm Muestra 2			No.	P7		TECNICA 2							
FECHA	del	DIAS	MES	AÑO										
DURACIÓN	08:02:00			h:m:s										
INICIO	12:00	hr	Viernes/26/Diciembre/2014											
PRENDIDO PLACA CALIENTE	12:08	hr	Viernes/26/Diciembre/2014											
APAGADO PLACA CALIENTE	18:00	hr	Viernes/26/Diciembre/2014											
TERMINO	20:02	hr	Viernes/26/Diciembre/2014											
2. MEDICIONES					ESTADO PERMANENTE			4. TEMPERATURA % CARAS						
INTERVALO	14:52	a	15:18	hr	Viernes/26/Diciembre		HORA	CALIENTE	FRIÁ					
DURACIÓN	00:26:00			min					14:52	38.30	26.65			
3. CALCULOS ECUACIONES SIMBOLO DEFINICIÓN UNIDADES $\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right) \quad C = \frac{P}{A \times \Delta t}$					λ conductividad térmica W/m °C C conductancia térmica W/m² °C P potencia de la resistencia W A área de medición m² L separación entre placas m ΔT diferencial de temperatura K			14:56	38.30	26.90				
								14:58	38.30	27.00				
DATOS DE ENTRADA P = 75.33 W A = 0.04 m² L = 0.0130 m					λ = P × (L / (A × Δt)) C = P / (A × Δt)			15:00	38.30	27.00				
								15:02	38.30	27.15				
Σ TEMPERATURAS % CARAS PC = 41.55 °C PF = 34.87 °C ΔT = 6.69 °C					DATOS DE ENTRADA P = 75.33 W A = 0.04 m² L = 0.0130 m			15:04	38.30	27.00				
								15:06	38.05	27.00				
5. RESULTADOS λ 2.1714 W/m °C C 167.03 W/m² °C					Σ TEMPERATURAS % CARAS PC = 38.23 °C PF = 26.95 °C ΔT = 11.28 °C			15:08	38.05	27.00	Δ ₁	0.25	0.35	
								15:10	38.05	27.00	Σ	38.225	26.95	Δ ₁

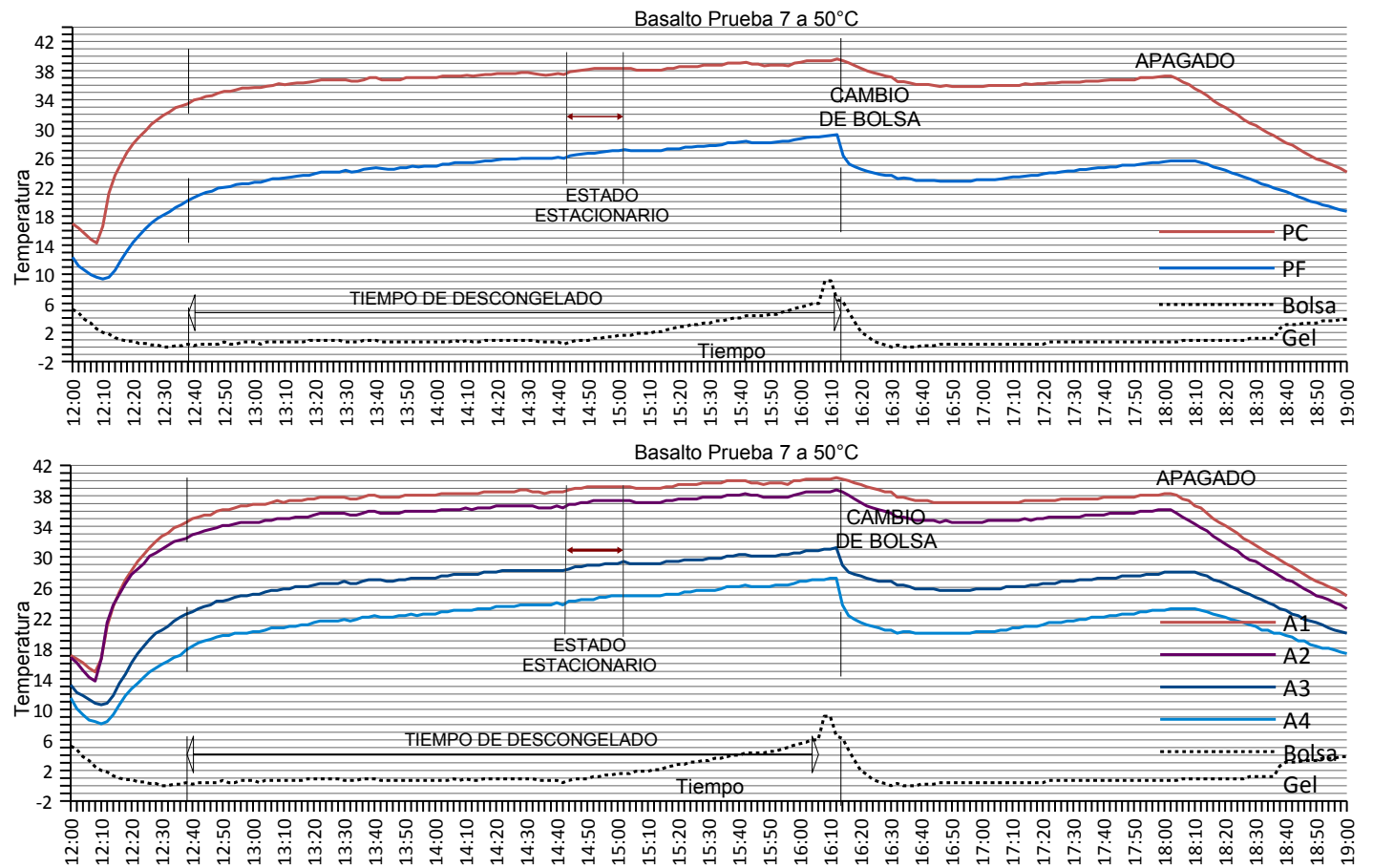
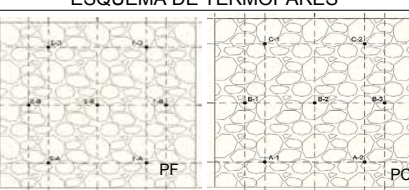
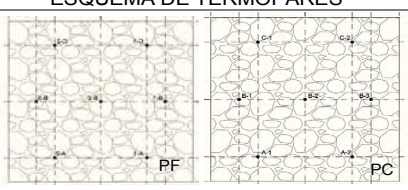


Figura A3.4: Formato desglosado para la prueba 7 – técnica 2, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar. (Elaboración propia)

Anexo 4 – Formatos desglosados de análisis térmico para muestras de gaviones.

1. DATOS DE PRUEBA		INTERVALO DE MEDICIÓN @		2	min	TECNICA 1	ESQUEMA DE TERMOPARES			
MUESTRA A EVALUAR	Gavión con basalto 0.30 cm espesor		No.	P2						
FECHA	del 8 al 9		MES	DIAS	AÑO					
DURACIÓN	24:00:00		h:m	diciembre	2014					
INICIO	08:35		hr	Lunes/08/Diciembre/2014						
ENCENDIDO P. CALIENTE	08:51		hr	Lunes/08/Diciembre/2014						
APAGADO P. CALIENTE	08:53		hr	Martes/09/Diciembre/2014						
TERMINO	14:53		hr	Martes/09/Diciembre/2014						
2. MEDICIONES		ESTADO PERMANENTE								
INTERVALO	19:07 a 19:51		hr	Lunes/08/Diciembre						
DURACIÓN	00:44:00		min							
3. CALCULOS		ECUACIONES		SIMBOLO	DEFINICIÓN	UNIDADES				
		$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right)$		$C = \frac{P}{A \times \Delta t}$	λ	conductividad térmica	W/m °C			
					C	conductancia térmica	W/m² °C			
					P	potencia de la resistencia	W			
					A	área de medición	m²			
					L	separación entre placas	m			
					ΔT	diferencial de temperatura	K			
DATOS DE ENTRADA		P =	194.51 W							
		A =	1.00 m²							
		L =	0.3100 m							
Σ TEMPERATURAS % CARAS		PC =	46.58 °C							
		PF =	19.72 °C							
		ΔT =	26.86 °C							
		5. RESULTADOS								
		λ	2.24	W/m °C						
		C	7.24	W/m² °C	Δ_i	0.06	0.17			
					Σ	46.58	19.72			
					Δ_i	26.86				

1. DATOS DE PRUEBA		INTERVALO DE MEDICIÓN @		2	min	NA	ESQUEMA DE TERMOPARES			
MUESTRA A EVALUAR	Gavión basalto 0.30 cm + Ventilación		No.	P7						
FECHA	del 29 al 29		MES	DIAS	AÑO					
DURACIÓN	09:36:00		h:m	diciembre	2014					
INICIO	10:24		hr	Lunes/29/Diciembre/2014						
ENCENDIDO P. CALIENTE	10:30		hr	Lunes/29/Diciembre/2014						
APAGADO P. CALIENTE	19:30		hr	Lunes/29/Diciembre/2014						
TERMINO	20:00		hr	Lunes/29/Diciembre/2014						
2. MEDICIONES		ESTADO PERMANENTE								
INTERVALO	16:38 a 17:54		hr	Lunes/29/Diciembre						
DURACIÓN	01:16:00		min							
3. CALCULOS		ECUACIONES		SIMBOLO	DEFINICIÓN	UNIDADES				
		$\lambda = P \times \left(\frac{L}{A \times \Delta t} \right)$		$C = \frac{P}{A \times \Delta t}$	λ	conductividad térmica	W/m °C			
					C	conductancia térmica	W/m² °C			
					P	potencia de la resistencia	W			
					A	área de medición	m²			
					L	separación entre placas	m			
					ΔT	diferencial de temperatura	K			
DATOS DE ENTRADA		P =	194.51 W							
		A =	1.00 m²							
		L =	0.3100 m							
Σ TEMPERATURAS % CARAS		PC =	27.34 °C							
		PF =	22.73 °C							
		ΔT =	4.61 °C							
		5. RESULTADOS								
		λ	13.08	W/m °C						
		C	42.18	W/m² °C	Δ_i	0.09	0.11			
					Σ	27.34	22.73			
					Δ_i	4.61				

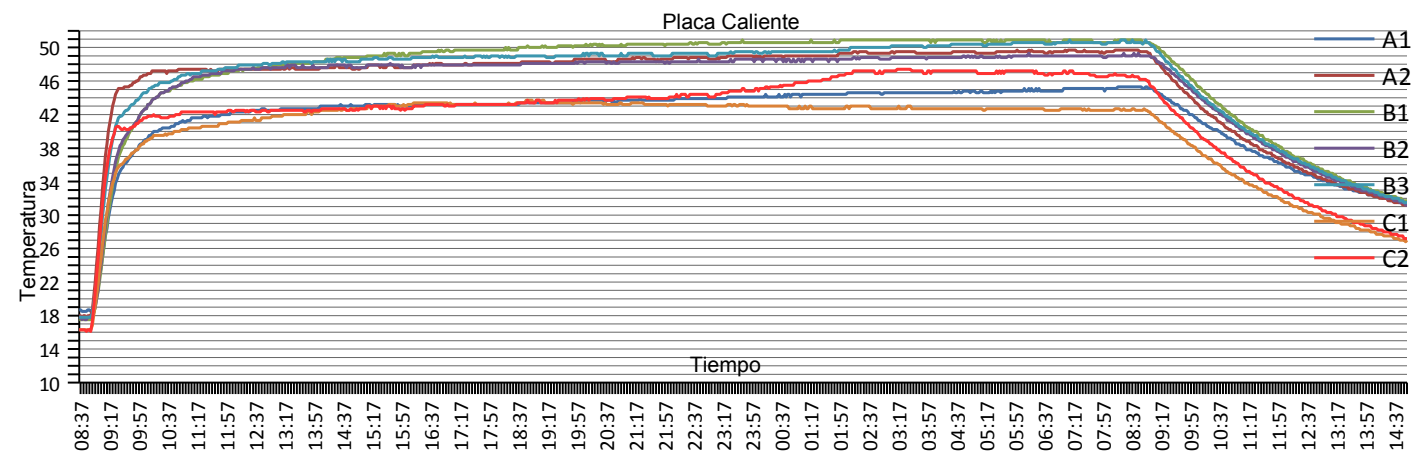
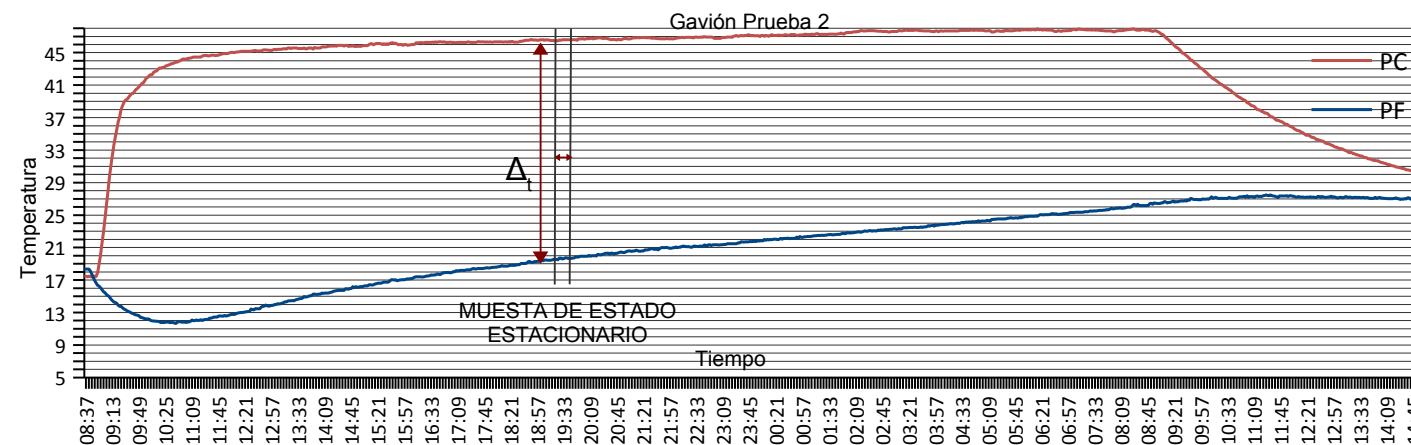


Figura A4.1: Formato desglosado para la prueba 2 – técnica 1, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar. (Elaboración propia)

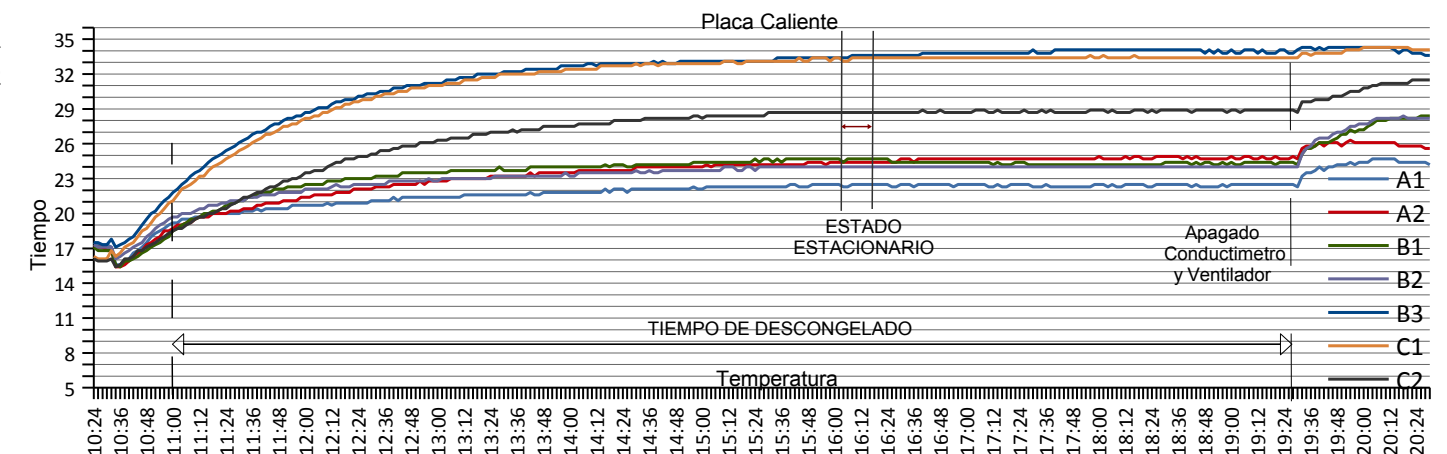
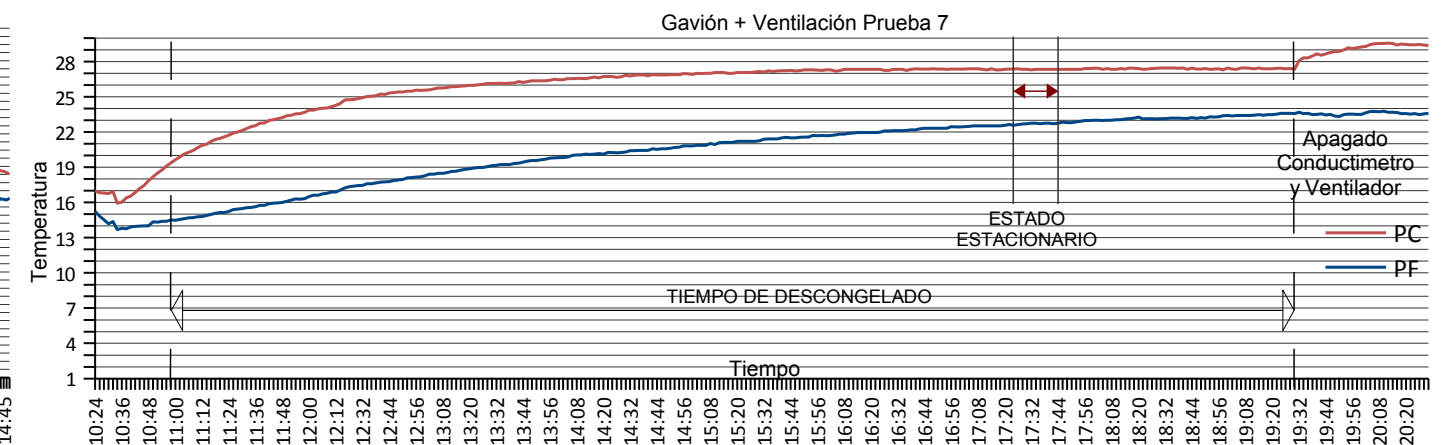


Figura A4.2: Formato desglosado para la prueba 7, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar. (Elaboración propia)

12.- Índice de Figuras, tablas y ecuaciones.

Capítulo 1

Capítulo 2

Figuras

- Figura 2.1 Acomodo de las hojas en el tallo de la especie *Linaria trionithophora* y escalera helicoidal de la pirámide del Louvre de I. M. Pei.
Figura 2.2 Viviendas trogloditas en Capadocia, Turquía. Y Colonia de aves *Merops bullockoides*, Sudáfrica.
Figura 2.3 Estructura de la producción de energía primaria en México durante el 2011.

Capítulo 3

Figuras

- Figura 3.1 Nido de termitas *Cubitermes* en Guinea y Longhua Pagoda, Shanghai.
Figura 3.2 Nido colectivo de la especie *Philetairus socius* en Namibia.
Figura 3.3 Diseño del *Hydrological Center*, Universidad de Namibia inspirado en el escarabajo *Stenocara gracilipes*.

Capítulo 3

Tablas

- Tabla 3.1 Principales publicaciones sobre biomimesis.

Capítulo 4

Figuras

- Figura 4.1 Esquema de metodología desarrollada.

Capítulo 5

Figuras

- Figura 5.1 Preselección de casos de estudio.
Figura 5.2 Preselección de casos de estudio.
Figura 5.3 Montículo de *Amitermes meridionalis* durante la época de lluvias.
Figura 5.4 Montículo de *Amitermes meridionalis* durante la época seca.
Figura 5.5 Distribución de montículos estudiados y la variación en la orientación en tres poblaciones Australianas.
Figura 5.6 Efecto de la orientación en la temperatura.
Figura 5.7 Nubosidad promedio de las tres poblaciones de estudio.
Figura 5.8 Velocidad del viento promedio de las tres poblaciones de estudio.
Figura 5.9 Datos climáticos para el área de Darwin, Australia.
Figura 5.10 Radiación diaria promedio para dos estructuras con una variación en la orientación de 10°.
Figura 5.11 Orientación sureste de un nido de *Pogonomyrmex occidentalis*.
Figura 5.12 Carta psicrométrica para el área de Omatjete, Namibia.
Figura 5.13 Centro cultural Jean-Marie Tjibaou, Renzo Piano.
Figura 5.14 Montículo de *Macrotermes michaelseni*.
Figura 5.15 Eastgate Center, Harare, Zimbabwe de Michael Pearce.
Figura 5.16 Esquema de ventilación del Eastgate Center.
Figura 5.17 Modelos de ventilación propuestos en los años setenta para los montículos de termitas.
Figura 5.18 Arquitectura del montículo de *Macrotermes michaelseni*.
Figura 5.19 Distribución de la presión del viento sobre el montículo de *Macrotermes michaelseni*.
Figura 5.20 Gráfica de distintas frecuencias de viento.
Figura 5.21 Filtrado de frecuencias dentro del montículo.
Figura 5.22 Intercambio de aire entre el montículo y el nido.
Figura 5.23 Datos climáticos para el área de Omatjete, Namibia.
Figura 5.24 Amplitud de la temperatura mensual para el área de Omatjete, Namibia.
Figura 5.25 Gráfica de temperatura mensual del nido de *Macrotermes michaelseni*.

Figura 5.26	Captador de viento, Iran y modelo tridimensional de un montículo de <i>Macrotermes michaelseni</i> .
Figura 5.27	Rosa de los vientos para el área de Omatjete, Namibia.
Figura 5.28	Sombrea del viento generada por un montículo.
Figura 5.29	Gradiente de presión horizontal generada por un montículo al paso del viento.
Figura 5.30	Gradiente de presión vertical generada por un montículo al paso del viento.
Figura 5.31	Arquitectura externa del montículo de <i>Atta vollenweideri</i> .
Figura 5.32	Arquitectura interna del montículo de <i>Atta leavigata</i> .
Figura 5.33	Gráfica de concentraciones de gases en las aberturas del nido de <i>Atta leavigata</i> en relación a la altura.
Figura 5.34	Caracterización de aberturas en función de la altura.
Figura 5.35	Correlación entre la velocidad del viento y la concentración de CO ₂ .
Figura 5.36	Temperatura de bulbo seco y humedad relativa dentro de los túneles del montículo de <i>Atta vollenweideri</i> .
Figura 5.37	Torres de ventilación de los montículos de <i>Atta vollenweideri</i> .
Figura 5.38	Datos climáticos para el área de Botucatu, Sao Paulo, Brasil.
Figura 5.39	Datos climáticos para la Provincia de Formosa, Argentina.
Figura 5.40	Comparativo de los principales factores climáticos para Botucatu y la Provincia de Formosa.
Figura 5.41	Temperatura anual promedio del terreno en la Provincia de Formosa.
Figura 5.42	Modelo tridimensional del montículo de la hormiga <i>Atta</i> .
Figura 5.43	Sombra del viento generada por el montículo de la hormiga <i>Atta</i> .
Figura 5.44	Gradiente de presión generado por el montículo de la hormiga <i>Atta</i> .
Figura 5.45	Gráfica representativa del amortiguamiento y el retardo térmico.
Figura 5.46	Envolvente del National Aquatics Center (Watercube), Beijing.
Figura 5.47	Nidos de un solo peine vertical de la abeja melífera, <i>Apis dorsata</i> .
Figura 5.48	Esquema de la arquitectura interna del nido de la abeja <i>Meliponini</i> .
Figura 5.49	Nidos de la abeja <i>Trigona spinipes</i> y de <i>Trigona carbonaria</i> .
Figura 5.50	Nido de la abeja <i>Partamona pearsoni</i> .
Figura 5.51	Nidos con peines verticales de la abeja <i>Apis melífera</i> .
Figura 5.52	Desempeño térmico para dos sistemas constructivos y gasto energético.
Figura 5.53	Medición experimental de un nido de abejas <i>Tetragosnica angustula</i> .
Figura 5.54	Medición experimental de un nido de abejas <i>Trigona nigra paupera</i> .
Figura 5.55	Gráficas de temperatura de un nido de abejas <i>Tetragosnica angustula</i> .
Figura 5.56	Producción de calor dentro de un nido de abejas <i>Tetragosnica angustula</i> .
Figura 5.57	Gráficas de temperatura de un nido de abejas <i>Trigona nigra paupera</i> .
Figura 5.58	Producción de calor dentro de un nido de abejas <i>Trigona nigra paupera</i> .
Figura 5.59	Gráficas de temperatura para dos períodos de un nido de abejas <i>Trigona ventralis hoozana</i> .
Figura 5.60	Nido de la avispa <i>Polistes gallicus</i> y esquema de la envolvente funcional.
Figura 5.61	Nido de la avispa <i>Chartegus Chartarius</i> .
Figura 5.62	Gráficas de temperatura de un nido de avispas <i>Polybia paulista</i> estando habitado y vacío.
Figura 5.63	Nido multicapa de la avispa <i>Vespa crabro</i> .
Figura 5.64	Gráficas de temperatura al interior del nido de la especie <i>Vespa crabro</i> .
Figura 5.65	Gráficas de temperatura al interior del nido de la especie <i>Vespa crabro</i> .
Figura 5.66	Nido de avispas <i>Polybia spinifex</i> y gráfica de temperatura al interior.

Capítulo 5

Tablas

Tabla 5.1	Matriz de casos de estudio según la principal estrategia bioclimática.
Tabla 5.2	Propiedades térmicas de la miel en comparación con el agua.
Tabla 5.3	Características de dos nidos de abejas estudiados (<i>Tetragosnica angustula</i> y <i>Trigona nigra paupera</i>).

Tabla 5.4	Algunas propiedades del papel en las envolventes de las avispas.
Tabla 5.5	Propiedades térmicas de distintos materiales en comparación a la envolvente de papel de la especie <i>Vespa crabro</i> .
Tabla 5.6	Propiedades térmicas de distintos materiales.
Tabla 5.7	Coefficiente de transmisión calorífica “U” y tiempos de inercia térmica para muros de distintos materiales.
Capítulo 6	Figuras
Figura 6.1	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de termitas <i>Amitermes meridionalis</i> .
Figura 6.2	Amortiguamiento térmico para un muro de adobe durante enero.
Figura 6.3	Casa Rose Pauson, Phoenix Arizona. Frank Lloyd Wright.
Figura 6.4	Construcciones destinadas al almacenamiento de alimentos.
Figura 6.5	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de termitas <i>Macrotermes michaelseni</i> .
Figura 6.6	Humedad superficial y radiación incidente como parte de las principales estrategias de las termitas <i>Macrotermes michaelseni</i> .
Figura 6.7	Torre de viento Irani, esquema en planta y elevación.
Figura 6.8	Centro cultural Jean-Marie Tjibaou, esquema de ventilación, Renzo Piano.
Figura 6.9	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de hormigas <i>Atta laevigata</i> .
Figura 6.10	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de hormigas <i>Atta laevigata</i> .
Figura 6.11	Esquema de ventilación natural en el Panteón Romano.
Figura 6.12	Albergues a partir del sistema “superadobe” de Nader Khalili.
Figura 6.13	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de abejas <i>Meliponini</i> .
Figura 6.14	Muros de agua en viviendas en Nuevo México de Steve Baer y hórreo tradicional español.
Figura 6.15	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de avispas <i>Pollistes gallicus</i> .
Figura 6.16	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para un nido de avispas con base en la arquitectura <i>phragmocyttaurous</i> .
Figura 6.17	Síntesis de estrategias de climatización encontradas para la especie de avispas <i>Vespa crabro</i> .
Figura 6.18	Envolvente del National Aquatics Center (Watercube), Beijing.
Capítulo 7	Figuras
Figura 7.1	Simbología de casos de estudio.
Figura 7.2	Matriz de estrategias de Control Climático en función de los mecanismos de transferencia de calor.
Figura 7.3	Diagrama sintético de estrategias para el caso 1, <i>Amitermes meridionalis</i> .
Figura 7.4	Diagrama sintético de estrategias para el caso 2, <i>Macrotermes michaelseni</i> .
Figura 7.5	Diagrama sintético de estrategias para el caso 3, <i>Atta laevigata</i> y <i>vollenweideri</i> .
Figura 7.6	Diagrama sintético de estrategias para el caso 4, <i>Apis mellifera</i> y <i>meliponini</i> .
Figura 7.7	Diagrama sintético de estrategias para el caso 5, <i>Polistinae</i> y <i>Vespinae</i> .
Figura 7.8	Síntesis de mecanismos seleccionados para aplicar a una envolvente arquitectónica con base en 3 casos de estudio.
Figura 7.9	Temperaturas y humedades horarias para la ciudad de Mexicali.

Figura 7.10	Estrategias bioclimáticas según los triángulos de confort de Evans.
Figura 7.11	Estrategias de diseño pasivo basadas en la carta psicrométrica para interiores de Givoni.
Figura 7.12	Carta psicrométrica para interiores de la ciudad de Mexicali.
Capítulo 7	Tablas
Tabla 7.1	Sistemas de termoregulación pasivos en diferentes grupos de insectos.
Capítulo 8	Figuras
Figura 8.1	Superficie porosa de los nidos de <i>Macrotermes michaelseni</i> y muro gavión.
Figura 8.2	Muro de contención a partir gaviones de piedra.
Figura 8.3	Dominus Winery, en Napa California, Herzog y de Meuron.
Figura 8.4	Diagrama de diseño conceptual de las estrategias seleccionadas.
Figura 8.5	Muro gavión con distintas porosidades a partir del tamaño del agregado.
Figura 8.6	Visualización de una envolvente porosa confrontada al paso del viento.
Figura 8.7	Dispositivos para aumentar la tasa de ventilación de la envolvente.
Figura 8.8	Sección y alzado de la envolvente propuesta.
Figura 8.9	Perspectiva de una envolvente porosa con ventilación selectiva.
Figura 8.10	Visualización de una envolvente porosa confrontada al paso del viento.
Figura 8.11	Visualización del paso del viento a través de una envolvente porosa.
Figura 8.12	Aumento en la porosidad de una envolvente mediante ductos.
Figura 8.13	Envolvente porosa en conjunto con formas curvas.
Figura 8.14	Envolvente porosa en conjunto con formas curvas.
Figura 8.15	Gradiente de presión en una envolvente porosa con formas curvas.
Figura 8.16	Cortes esquemáticos de una envolvente porosa que aprovecha el gradiente de presión vertical.
Figura 8.17	Perspectiva de una envolvente curva con distintos porcentajes de porosidad.
Capítulo 8	Tablas
Tabla 8.1	Tabla de porosidad reportada según el tamaño del agregado.
Tabla 8.2	Tiempo de retraso y algunas características termofísicas para tres distintos tipos de piedra.
Tabla 8.3	Posibles materiales a reutilizar en gaviones provenientes de demolición.
Capítulo 9	Figuras
Figura 9.1	Diagrama de evaluación de la envolvente propuesta.
Figura 9.2	Gaviones de piedra como muestra de estudio.
Figura 9.3	Figura esquemática de un material poroso.
Figura 9.4	Figura esquemática de la relación entre el volumen del vacío y el volumen total de la muestra.
Figura 9.5	Equipo y material empleado para análisis de porosidad, densidad y absorción.
Figura 9.6	Llenado de muestras para determinar el coeficiente de porosidad.
Figura 9.7	Agregado de agua a cada una de las muestras y vibrado del depósito.
Figura 9.8	Muestras de estudio para estimación de la densidad del material.
Figura 9.9	Muestras durante la medición de la densidad.
Figura 9.10	Muestras durante la medición de la absorción.
Figura 9.11	Gaviones muestra para evaluación de porosidad.
Figura 9.12	Gaviones como prototipo de envolvente porosa al viento.
Figura 9.13	Material y equipo utilizado durante la evaluación de ventilación.

Figura 9.14	Material y equipo utilizado durante la evaluación de ventilación.
Figura 9.15	Figura esquemática de la comparación de velocidad de viento entre una muestra sólida y una porosa.
Figura 9.16	Figura esquemática de la comparación de velocidad de viento entre una muestra sólida y una porosa.
Figura 9.17	Matriz de puntos de medición para la evaluación de ventilación.
Figura 9.18	Vista tridimensional de la matriz de puntos de medición para la evaluación de ventilación.
Figura 9.19	Vista del área de pruebas del túnel de viento.
Figura 9.20	Perfiles de velocidad verticales para los planos X,Y y Z en el túnel de viento sin muestra de estudio.
Figura 9.21	Vista interior del túnel de viento sin muestra de estudio.
Figura 9.22	Plano esquemático de la ubicación del túnel de viento de la UAM-A.
Figura 9.23	Perfiles de velocidad horizontales para los planos X,Y y Z en el túnel de viento para la muestra sólida.
Figura 9.24	Muestra porosa y tubo pitot durante la evaluación de ventilación.
Figura 9.25	Comparación de velocidad para una muestra solida y una porosa (X).
Figura 9.26	Comparación de velocidad para una muestra solida y una porosa (Y).
Figura 9.27	Comparación de velocidad para una muestra solida y una porosa (Z).
Figura 9.28	Perfil de velocidad vertical para el plano Z en el eje central 3 del túnel de viento para la comparar la muestra sólida y la porosa.
Figura 9.29	Vista tridimensional de los planos de luz para las visualizaciones de la trayectoria del viento.
Figura 9.30	Ubicación de la cámara fotográfica para visualizaciones.
Figura 9.31	Interior del túnel de viento antes de la visualizaciones.
Figura 9.32	Uso de la máquina de humo como trazador durante las visualizaciones.
Figura 9.33	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 2 sección X – Sólido.
Figura 9.34	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 2 sección X – Porosa.
Figura 9.35	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 2 sección Z – Sólido.
Figura 9.36	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 2 sección Z – Porosa.
Figura 9.37	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 1 y 3 sección X – Sólido.
Figura 9.38	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 1 y 3 sección X – Porosa.
Figura 9.39	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 3 sección Y y Z – Sólido.
Figura 9.40	Secuencia de la trayectoria del flujo para el plano 3 sección Y y Z – Porosa.
Figura 9.41	Muestra de basalto y placa fría con sus respectivos termopares.
Figura 9.42	Gráfica muestra del comportamiento térmico del basalto.
Figura 9.43	Diagrama de factores que afectan las propiedades termofísicas de la rocas volcánicas y sedimentarias. Y variación de la conductividad térmica del basalto en función de la porosidad.
Figura 9.44	Gráfica de calor específico en el tiempo para la muestra 2 de basalto.
Figura 9.45	Muestras de basalto con ranuras para evaluación térmica.
Figura 9.46	Puntos de medición sobre la placa caliente o fría y muestras de estudio.
Figura 9.47	Bastidor y apuntador láser para alineación de puntos de medición.
Figura 9.48	Llenado del gavión en el conductímetro de gran formato.
Figura 9.49	Colocación de la placa fría sobre el gavión y vista general del conductímetro.
Figura 9.50	Gráfica ejemplo del comportamiento térmico para una muestra de gavión P4.
Figura 9.51	Bastidor para evaluación térmica durante la prueba de carga.
Figura 9.52	Diagrama de evaluación térmica con flujo de viento incluido.
Figura 9.53	Proceso de llenado del conductímetro de gran escala con muestra de gavión.
Figura 9.54	Vista general del conductímetro durante la prueba de ventilación.
Figura 9.55	Gráfica ejemplo del comportamiento térmico para una muestra de gavión con ventilación forzada (P8).

- Figura 9.56 Comparativo del ΔT para una evaluación térmica de Gavión y una de Gavión + Ventilación.
 Figura 9.57 Diagrama comparativo de un Gavión y de un Gavión + Ventilación.

Capítulo 9

Tablas

- Tabla 9.1 Especificaciones de gaviones para muestra de estudio.
 Tabla 9.2 Especificaciones del material de relleno a partir de piedra.
 Tabla 9.3 Tamaño de piedras de relleno para cada una de las muestras.
 Tabla 9.4 Volumen de agua agregada a cada una de las muestras.
- Tabla 9.5 Estimación del volumen que ocupa el sólido.
 Tabla 9.6 Estimación del coeficiente de porosidad para tres muestras.
 Tabla 9.7 Estimación de la densidad del sistema gavión y del material por si solo.
 Tabla 9.8 Medición de la densidad del material.
 Tabla 9.9 Propiedades térmicas según la NOM-008-ENER-2001 para algunas piedras.
 Tabla 9.10 Porcentaje de absorción para tres muestras de roca tipo basalto.
 Tabla 9.11 Datos climáticos para la medición en el túnel de viento sin muestra.
 Tabla 9.12 Velocidad del viento para los planos X,Y y Z en el túnel de viento sin muestra.
 Tabla 9.13 Datos climáticos para la medición en el túnel de viento para la muestra sólida.
 Tabla 9.14 Velocidad del viento para los planos X,Y y Z en el túnel de viento para la muestra sólida.
 Tabla 9.15 Datos climáticos para la medición en el túnel de viento de muestra porosa.
 Tabla 9.16 Velocidad del viento para los planos X,Y y Z en el túnel de viento para la muestra porosa.
 Tabla 9.17 Datos de porosidad encontrado para tres muestras.
 Tabla 9.18 Estimación del área de abertura para un gavión muestra.
 Tabla 9.19 Estimación del volumen de aire que atraviesa la muestra.
 Tabla 9.20 Comparativo del número de renovaciones de aire por hora entre una abertura simple y un gavión.
 Tabla 9.21 Datos obtenidos durante la prueba P6 para el cálculo de conductividad y conductancia térmica del basalto.
 Tabla 9.22 Resultados de 5 pruebas térmicas realizadas a 2 muestras de basalto.
 Tabla 9.23 Propiedades térmicas del basalto reportadas en distintas bibliografías.
 Tabla 9.24 Tabla de resultados obtenidos durante la medición del calor específico.
 Tabla 9.25 Datos obtenidos durante la prueba P4 para el cálculo de conductividad y conductancia térmica.
 Tabla 9.26 Resultados de 5 pruebas térmicas realizadas a muestra de gavión.
 Tabla 9.27 Caracterización de ventiladores.
 Tabla 9.28 Datos obtenidos durante la prueba P8 para el cálculo de conductividad y conductancia térmica.
 Tabla 9.29 Resultados de 5 pruebas térmicas realizadas a muestra de gavión con ventilación.
 Tabla 9.30 Comparativo de resultados, para el basalto, gavión y gavión + ventilación.
 Tabla 9.31 Símbolos, definiciones y unidades para determinar el resumen de las principales propiedades termofísicas de la muestra de estudio.
 Tabla 9.32 Principales propiedades termofísicas de las muestras de estudio.
 Tabla 9.33 Tiempos de retraso térmico para distintos materiales.

Capítulo 9

Ecuaciones

- Ecuación 9.1 Para estimar el coeficiente de porosidad.
 Ecuación 9.2 Para estimar la densidad.
 Ecuación 9.3 Para estimar el porcentaje de absorción del agregado (masa).

Ecuación 9.4	Para estimar el porcentaje de absorción del agregado (volumen).
Ecuación 9.5	Para determinar el volumen de aire que pasa a través de la muestra.
Ecuación 9.6	Para estimar la tasa de ventilación necesaria para renovar el aire.
Ecuación 9.7	Para estimar la conductividad térmica del basalto.
Ecuación 9.8	Para estimar la conductancia térmica del basalto.
Ecuación 9.9	Para estimar calor específico del basalto.
Ecuación 9.10	Para estimar la densidad.
Ecuación 9.11	Para estimar la resistencia térmica.
Ecuación 9.12	Para estimar el coeficiente de conductividad térmica-U.
Ecuación 9.13	Para estimar la difusividad térmica.
Ecuación 9.14	Para estimar el retardo térmico.

Capítulo 10 Figuras

Figura 10.1	Simulación del desempeño térmico de un gavión modificando la absorción y la conductividad.
Figura 10.2	Esquema de paneles para regulación de la ventilación y la masa térmica.
Figura 10.3	Esquema de paneles para regulación de la ventilación y la masa térmica.
Figura 10.4	Orfanato Falatow Jigiyaso, Mali. Y Casa Gavión, Los Cabos, BCS.
Figura 10.5	Casa club Bosque Altozano, Morelia. Y Centro Hani, Korea.
Figura 10.6	Fachada de acceso de la <i>Stone House de Sambuichi Architects</i> .
Figura 10.7	Fachada de posterior de la <i>Stone House de Sambuichi Architects</i> .
Figura 10.8	Planta y corte de integración de envolvente de gaviones a edificio existente.
Figura 10.9	Planta y corte de integración de envolvente de gaviones a edificio existente.
Figura 10.10	Planta y corte de integración de envolvente de gaviones a edificio existente.

Capítulo 10 Tablas

Tabla 10.1	Lista de edificios que han utilizado gaviones como parte de su envolvente.
Tabla 10.2	Comparativo del peso de un muro con distintos materiales.
Tabla 10.3	Impacto ambiental en base a eco-indicadores para tres distintos materiales.

Anexo 1 Figuras

Figura A1.1	Figura conceptual del aparato medidor de flujo de calor bajo el sistema de placa caliente guardada
Figura A1.2	Conductímetro de placa caliente de gran formato (Terres Martínez, 2015)
Figura A1.3	Fase inicial de armado del medidor de flujo de calor de placa caliente.
Figura A1.4	Fase inicial de armado del medidor de flujo de calor de placa caliente.
Figura A1.5	Fase inicial de armado del medidor de flujo de calor de placa caliente.
Figura A1.6	Elementos que componen la placa fría.
Figura A1.7	1a prueba de calibración de la temperatura de operación del equipo.
Figura A1.8	Vista superior del equipo durante la 1a calibración.
Figura A1.9	Placa caliente y modificación al control de temperatura.
Figura A1.10	Segundo armado del medidor de flujo de calor.
Figura A1.11	Ubicación de termopares para 1a calibración.
Figura A1.12	Gráfica de temperatura de operación – 1er ajuste.
Figura A1.13	Tercer armado de la placa caliente con pirómetro, relevador y termopar.
Figura A1.14	Tercer armado del medidor de flujo de calor.
Figura A1.15	Gráfica de temperatura de operación – 3er ajuste.
Figura A1.16	Ubicación de termopares para 2a calibración.
Figura A1.17	Cámara termográfica Fluke Ti25 para calibración de distribución de calor.
Figura A1.18	Secuencia de la prueba de calibración de distribución de calor (40°C).
Figura A1.19	Acercamiento de la placa caliente durante calibración.

Figura A1.20	Perspectiva de la placa caliente durante calibración.
Figura A1.21	Secuencia de la prueba de calibración de distribución de calor (50°C).
Figura A1.22	Acercamiento de la placa caliente durante calibración.
Figura A1.23	Perspectiva de la placa caliente durante calibración.
Figura A1.24	Secuencia de la prueba de calibración de distribución de calor (60°C).
Figura A1.25	Acercamiento de la placa caliente durante calibración.
Figura A1.26	Perspectiva de la placa caliente durante calibración.
Figura A1.27	Muestra de tablaroca para calibración y equipo.
Figura A1.28	Gráficas de potencia del equipo.
Figura A1.29	Esquema de ubicación de termopares sobre muestra de tablaroca.
Figura A1.30	Analizador de potencia durante prueba piloto.
Figura A1.31	Gráfica muestra del comportamiento térmico de un tablaroca durante calibración (técnica 1 – prueba 4).
Figura A1.32	Gráfica muestra del comportamiento térmico de un tablaroca durante calibración (técnica 2 – prueba 8).
Figura A1.33	Comparativo del comportamiento térmico para la misma muestra de basalto con dos técnicas diferentes
Figura A1.34	Muestra de estudio dentro del equipo.
Figura A1.35	Secuencia de la producción de muestras de estudio.

Anexo 1 Tablas

Tabla A1.1	Tabla de valores medidos para estimar la potencia del equipo.
Tabla A1.2	Datos de la prueba 4/5 para la muestra de tablaroca.
Tabla A1.3	Resultados de conductividad y conductancia para la prueba 4/5 .
Tabla A1.4	Resultados de conductividad y conductancia térmica para 5 pruebas de tablaroca durante calibración de equipo (técnica 1).
Tabla A1.5	Resultados de conductividad y conductancia térmica para 5 pruebas de tablaroca con ajuste en la técnica (técnica 2).
Tabla A1.6	Resultados de las 9 pruebas realizadas a 2 muestras de basalto con dos técnicas distintas
Tabla A1.7	Proporciones utilizadas para máscara de concreto en muestras de basalto.

Anexo 1 Ecuaciones

Ecuación A1.1	Para estimar la conductividad térmica λ .
Ecuación A1.2	Para estimar la conductancia térmica C.
Ecuación A1.3	Para estimar la potencia por tres distintos medios.
Ecuación A1.4	Para estimar la potencia por tres distintos medios.
Ecuación A1.5	Para estimar la potencia por tres distintos medios.

Anexo 2 Figuras

Figura A2.1	Diagrama ejemplo de puntos de medición.
Figura A2.2	Ejemplo de ranurado de muestras para ubicación de termopares.
Figura A2.3	Ejemplo de fijación de termopares.

Anexo 3 Figuras

Figura A3.1	Formato desglosado para la prueba 3 – técnica 1, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar (tablaroca).
Figura A3.2	Formato desglosado para la prueba 9 – técnica 2, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar (tablaroca).
Figura A3.3	Formato desglosado para la prueba 3 – técnica 1, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar (basalto).

Figura A3.4 Formato desglosado para la prueba 7 – técnica 2, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar (basalto).

Anexo 4 Figuras

Figura A4.1 Formato desglosado para la prueba 2 – técnica 1, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar (gavión).

Figura A4.2 Formato desglosado para la prueba 7, gráfica de temperaturas promedio y gráfica de cada termopar (gavión + ventilación).

13.- Fuentes.

Alatorre-Bracamontes, Carlos Eduardo y Vásquez-Bolaños, Miguel, (2010). *Lista comentada de las hormigas (Hymenoptera: Formicidae) del norte de México*, Dugesiana 17(1): 9-36

ASTM International, (2008). *D6711-01, Standard Practice for Specifying Rock to Fill Gabions, Revet Mattresses, and Gabion Mattresses*, 2p.

ASTM International, (2010). *C518-10, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*, 16p.

ASTM International, (2012). *C127-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*, 6p.

ASTM International, (2013). *C177-13, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, 23p.

Benyus, Janine. M. (2001). *A Biomimicry Primer, Biomimicry 3.8 Resource handbook*, biomimicry.net, asknature.org.

Bollazzi, M., Forti, L.C. y Roces, F., (2012). *Ventilation of the giant nests of Atta leaf-cutting ants: does underground circulating air enter the fungus chambers?*, Insectes Sociaux.

Bowman, N.T., Eppel, H., Lomas K.J., Robinson, D., Cook, M.J. (2000). *Passive Draught Evaporative Cooling*, Concept and precedents. Indoor Built Environ 9:284 -290.

Brown, G. Z. (1985). *Sun, wind, and light: Architectural design strategies*, 1a edición, John Wiley & Sons, Inc., USA, 176p.

Camargo Hernandez, J., Franco, Víctor. (2001). *Manual de gaviones*, Series del Instituto de Ingeniería UNAM, México, No. 624.

Camargo, João M. F. y Pedro, Silvia R. M. (2003). *Meliponini neotropicales: o gênero Partamona Schwarz, 1939 (Hymenoptera, Apidae, Apinae) – bionomia e biogeografia*, Revista Brasileira de Entomologia 47(3): 311-372.

Choi, Y. y Okos, M.R. (1986). *Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods*. Journal of Food Process and Applications. 1(1): 93 – 101.

Cole, B.J., (1994). *Nest architecture in the western harvester ant, Pogonomyrmex occidentalis* (Cresson), *Insectes Sociaux* 41: 401-410.

CONAFOVI. (2006). *Guía CONAFOVI, uso eficiente de la energía en la vivienda*, Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda, México, D.F, 108p.

Cosarinsky, Marcela I. y Rocés, Flavio, (2011). *The Construction of Turrets for Nest Ventilation in the Grass-Cutting Ant Atta vollenweideri: Import and assembly of building materials*, *J Insect Behav* 25:222–241.

Fuentes Freixanet, Víctor, (2004). *Clima y Arquitectura*, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, D.F, 306p.

García Chávez, Jose Roberto y Fuentes Freixanet, Víctor (2005). *Viento y Arquitectura, el viento como factor de diseño arquitectónico*, Trillas, México, D.F, 186p.

Grohmann, Constanze, (2010). Termite mediated heterogeneity of soil and vegetation patterns in a semi- arid savanna ecosystem in Namibia, *Julius- Maximilians- Universität Würzburg*, 122p.

Givoni, Baruch, (1994). *Passive Low Energy Cooling of Buildings*, Wiley, USA, 272p.

Gould, James y Gould Grant, Carol (2007). *Animal Architects, Building and the Evolution of Intelligence*, Basic Books, 336p.

Hansell, Mike, (2007). *Built by Animals The natural history of animal architecture*, Oxford University Press, 336p.

Hozumi, S. y Yamane, S. (2001). *Incubation ability of the functional envelope in paper wasp nest (Hymenoptera, Vespidae, Polistes): I. Field measurements of nest temperature using paper models*. *J. Ethol.* 19, 39-46.

Hozumi, S., Kudô, K. y Zucchi, R. (2008). *Promotion of Thermoregulatory Insulation in Nests of Neotropical Wasps by Building Extra Combs with Empty Cells*. *Neotropical Entomology* 37(2).

Hozumi, S., Yamane, S., Miyano, S., Mateus, S. y Zucchi, R. (2005). *Diel changes of temperature in the nests of two Polybia species, P. paulista and P. occidentalis (Hymenoptera, Vespidae) in the subtropical climate*. *J. Ethol.* 23:153-159.

Hozumi, S., Yamane, S. y Mateus, S. (2009). *Thermal Characteristics of the Mud Nests of the Social Wasp Polybia spinifex (Hymenoptera; Vespidae)*. *Sociobiology* Vol. 53, No. 1.

H.T. Ozkahraman, R. Selver, E.C. Isik. (2004). *Determination of the thermal conductivity of rock from P-wave velocity*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41, 703–708.

Huelsz, G., Barrios, G., Rechtman, R. Y Rojas J. (2012). *Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación*. En *Estudios de arquitectura bioclimática Anuario 2011* Vol. X, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México DF, 123p.

- Ishay, J. S. y Barenholz-Paniry, V. (1995). *Thermoelectric effect in hornet (Vespa orientalis) silk and thermoregulation in a hornet's nest*. J. Insect Physiol. 41, 753–759.
- Jacklyn, P.M., (1992). *Magnetic termite mound surfaces are oriented to suit wind and shade conditions*, Oecologia 91 (2003) 385-395.
- Jeanne, L Robert. (1975). *The adaptiveness of social wasp nest architecture*. The quarterly review of biology, Vol. 50, No. 3:267-287.
- Jones, Julia C. y Oldroyd, Benjamin P., (2007). *Nest thermoregulation in social insects*, Advances in insect physiology 33:153-191.
- Kleineidam, C., y Roces, F., (2000). *Carbon dioxide concentrations and nest ventilation in nests of the leaf-cutting ant Atta vollenweideri*, Insectes Sociaux 47: 241-248.
- Kleineidam, Christoph, Ernst, Roman, y Roces, Flavio, (2001). *Wind-induced ventilation of the giant nests of the leaf-cutting ant Atta vollenweideri*, Naturwissenschaften 88:301–305.
- Klingner, R., Richter, K. y Schmolz, E. (2006). *Strategies of social wasps for thermal homeostasis in light paper nests*. Journal of Thermal Biology 31:599-604.
- Kojima, J. (1993). *Old hornet nests acting as hibernacula for insects*. Japanese journal of entomology 61:589-594.
- Korb, Judith, (2003). *The shape of compass termite mounds and its biological significance*, Insectes Sociaux 50:218-221.
- Lepora, Nathan F., Verschure, Paul, y Prescott, Tony J., (2013). *The state of the art in biomimetics*, Bioinspiration & Biomimetics 8, 11p.
- López Martínez, Roberto y Oropeza Mota, José Luis. (2009). *Presas de gaviones*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación, SAGARPA, México, 14p.
- Martínez Strevel, Rodolfo. en Lacomba, Ruth. (1991). *Manual de Arquitectura Solar*, Trillas, México, 292p.
- McGovern, JN. Jeanne, RL. Effland, MJ., (1988). *The nature of paper wasp nest*. Tappi Journal. 71(12):133-139.
- Norberg-Schulz, Christian (1998). *Intenciones en Arquitectura*, 2a edición, Gustavo Gili, Barcelona, 240p.
- Olea, Oscar y González Lobo, Carlos (1988). *Metodología para el Diseño Urbano, Arquitectónico, Industrial y Gráfico*, Trillas, México, D.F, 159p.
- Olgay, Víctor. (2010). *Arquitectura y Clima, manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. 1a edición, 6a tirada, Gustavo Gili, Barcelona, 203p.
- ONNCCE, (2014). *Certificado Tablaroca núcleo regular 0.0127mm*. Vigencia mayo 2013 – mayo 2014.

- Pallasma, Juhani, (1995). *Animal Architecture*, Suomen Rakennustaitteen Museo, 128p.
- Rincón Martínez, J.C, Fuentes Freixanet, V. (2013). *Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies*, Energy Procedia 57, 2014, 1374 – 1382.
- Rodríguez Viqueira, Manuel y Fuentes Freixanet, Víctor, (2006). *Traditional Mayan Architecture According to Latitude and Altitude*, PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- Rojas Fernández, Patricia, (2001). *Las hormigas del suelo en México: diversidad, distribución importancia (hymenoptera:formicidae)*, Acta zoológica mexicana, número especial 1:189-238.
- Rudofsky, Bernard (1973). *Arquitectura sin arquitectos*, 1a edición, Editorial universitaria de buenos aires, Argentina.
- Santamouris, Mat. en Ghiaus, Cristian y Allard Francis (2005). *Natural Ventilation in the urban environment*. Earthscan, USA, 241p.
- Santamouris, Mat. (2006). *Environmental Design of Urban Buildings*. Earthscan, UK, 322p.
- Schmolz, E. Bruders, N., Daum, R. y Lamprecht, I. (2000). *Thermoanalytical investigations on paper covers of social wasps*. Thermochimica Acta 361:121-129.
- S. Siegesmund y H. Dürrast. (2014). *Physical and Mechanical Properties of Rocks, en Stone in Architecture*, Springer, 5a edición, 550p.
- Sung, I-Hsin. Yamane, S. y Hozumi, S. (2008). *Thermal Characteristics of Nests of the Taiwanese Stingless Bee Trigona ventralis hoozana (Hymenoptera: Apidae)*. Zoological Studies 47(4): 417-428
- Szokolay, S. (2008). *Introduction to Architectural Science The Basis of Sustainable Design*, Architectural Press, Elsevier, Oxford, 2a edición, 345p.
- Terblanche, Luther, (2006). *The prediction of flow through two-dimensional porous media*, MScEng Thesis, Stellen Bosch University, South Africa, 117p
- Terres Martínez, Guillermo, (2015). *Caracterización Térmica de Sistemas Constructivos basados en bambú*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. 150p.
- Terres Peña, Hilario. (2010) *Termografía Computacional para el Análisis de Falla Utilizando el Método de Elemento Frontera Híbrido*, Tesis de Doctorado. Instituto Politécnico Nacional. 220p.
- Torres, A., Hoffmann, W. y Lamprecht, I. (2007). *Thermal investigations of a nest of the stingless bee Tetragonisca angustula Illiger in Colombia*, Thermochimica Acta 458: 118-123.
- Torres, A., Hoffmann, W. y Lamprecht, I. (2009). *Thermal investigations of a nest of the stingless bee trigona (frieseomelitta) nigra paupera provancher in colombia*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 95: 737-741.

Tudela, Fernando, (1982). *Ecodiseño*, Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, México, D.F, 223p.

Turner, J. Scott y C. Soar, Rupert, (2008). *Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building*, First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction (I3CON), Loughborough University, 14-16.

Turner, J. Scott, Marais, Eugene, Vinte, Mendes, Mudengi, Angela y Park, Wendy, (2006). *Termites, water and soils*, Agricola 2006, Ministry of agriculture, water and forestry, 9p.

Turner, J. Scott, (2004). *Extended Phenotypes and Extended Organisms*, Biology and Philosophy 19: 327–352.

Vanden Broeck, Fabricio (2000). *El Diseño de la Naturaleza o la Naturaleza del Diseño*, 1a edición, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México DF, 159 p.

Visscher, K. (2009). *Homeostasis, Behavioral en Encyclopedia of Insects: Edition 2*, Academic Press - Publisher, pag. 458.

Watson, Donald y Labs, Kenneth (1983). *Climatic Design, Energy efficient building principles and practices*, McGraw-Hill, EU, 280p.

Electrónicas

asknature.org, consultado en junio de 2013.

biomimicry.net/about/biomimicry. Biomimicry 3.8. What is biomimicry?., consultado en junio de 2013.

conabio.gob.mx, consultado en junio de 2013.

esf.edu/efb/turner/termitePages/termiteMain.html, consultado en octubre de 2013.

herzogdemeuron.com, consultado en julio de 2014.

Turner, J. Scott (2013). Interview with Scott Turner, Zygote Quarterly 08, Invierno 2013,

Otros

Biomimicry Workshop. (2013). Universidad Iberoamericana. México DF, Veracruz Junio 2013.

Gordon Sánchez, Manuel D. (2014). Asesoría de tesis. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México DF.

Terres Martínez, Guillermo. (2014). Asesoría de tesis. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México DF.

Real Ramírez, César Augusto. (2014). Asesoría de tesis, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México DF.

Rojas Fernández, Patricia. (2013). Asesoría de tesis. INECOL, Instituto de Ecología A.C. de México.

14.- Curriculum Vitae Arq. Jaime Dávila Arribas

Formación

Licenciatura	Arquitectura, Universidad Iberoamericana UIA, Mexico D.F.
Diplomado	Diseño y construcción sostenibles Universidad Iberoamericana UIA, Mexico D.F.
Diplomado	Arquitectura bioclimática y sustentable. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. Mexico D.F.
Especialidad	Especialidad en diseño, línea Arquitectura Bioclimática. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Mexico D.F.

Idiomas

Inglés	Habla, Escribe y Lee(90%), CAE 2003 (Certificate in Advanced English)
--------	---

Experiencia Profesional

- 1999 - 2000 Diseño y construcción de casa habitación en Oacalco Morelos.
- 2000 – 2001 Trabajo en AEVUM, para los arquitectos Claudio y Christian Gantous. Desarrollo de proyectos arquitectónicos.
- 2001 – 2002 Trabajo independiente donde se desarrollaron distintos proyectos urbanos, entre ellos el Plan Parcial de Desarrollo Urbano de la delegación Milpa Alta, México D.F.
- 2003 – 2004 Trabajo en Marcos Arquitectos. Como jefe de Taller durante el desarrollo del proyecto Centro Cultural Magen David, Interlomas.
- 2004 – 2008 Trabajo en DVA, Diego Villaseñor Arquitectos y Asociados. Desarrollo de proyectos arquitectónicos, entre ellos el diseño y proyecto ejecutivo de los laboratorios CHINOIN, Aguascalientes. Y casa habitación en Ixtapa, Zihuatanejo.
- 2008 – 2009 Trabajo en Taller Central de Arquitectura TCA. Desarrollo de proyectos habitacionales y comerciales. Entre ellos el conjunto comercial Plaza Durango, Col Roma, Desarrollo habitacional Naos, Rosarito Baja California y Showroom y departamento muestra Naos.
- 2010 – 2014 Trabajo independiente donde se desarrollaron distintos proyectos arquitectónicos residencial, comercial y estudios urbanos, remodelación, ampliación y concursos. Entre ellos el Holcim Awards 2014 con el proyecto Dispersed Library, Santiago de Querétaro.