

CRITERIOS CLIMATICOS PARA EL DISEÑO DE TENSO ESTRUCTURAS EN REGIONES DEL TROPICO HUMEDO -ilustrado en el caso de Costa Rica- San José, 2011

Jan-Frederik Flor

Estudiante egresado: Escuela de Arquitectura, Taller Tropical, Universidad de Costa Rica.

Correo electrónico: janflor@gmx.de

**Palabras clave:** Clima, diseño, tenso estructuras, Trópico Húmedo

**Resumen:** El presente estudio intenta relacionar el clima tropical húmedo con la arquitectura textil, en específico, las tenso estructuras. Para este fin, se analizan aquellos factores que influyen en la sensación de confort higrotérmico del ser humano, ilustrado en el caso de Costa Rica, ubicado en la zona de convergencia intertropical en la latitud 10° del Hemisferio Norte. Paralelamente se identifican las características y propiedades de las tenso estructuras que, eventualmente, poseen el potencial para ser empleadas en técnicas universales de bioclimática y estrategias pasivas de acondicionamiento climático. Dicha adaptación al clima tropical es el principal objetivo para lograr espacios arquitectónicos que alcancen el máximo confort higrotérmico de los usuarios con los mínimos recursos.

**Introducción:** La función fundamental de la arquitectura, a través de la historia de la humanidad, ha sido la protección y el refugio ante las condiciones ambientales y climáticas: cuevas, tiendas y ranchos han sido los primeros intentos arquitectónicos para cumplir con estas necesidades esenciales y primarias. En épocas modernas, se han sumado otras incontables funciones y propósitos, aunque no siempre está claro cuál es la más importante ni cuál la predominante en la respuesta arquitectónica, sin embargo en tiempos de globalización, crisis energética y calentamiento global, se hace evidente la necesidad de retornar a las raíces de la función arquitectónica y cuestionar de qué forma se logra replantear su relación con el ambiente y el hombre. (Fig.1)

La arquitectura vernácula es un buen ejemplo de esta posible simbiosis, ya que se adapta con sus formas y usos de materiales a las condiciones de una región específica. Podemos aprender mucho de la relación intrínseca de las condiciones climáticas, el aprovechamiento eficiente de recursos y el respeto ante la coexistencia con otros sistemas ecológicos. Sin embargo, hay que transportar estos modelos a la realidad de la construcción industrial moderna y emplear nuevas herramientas y materiales para cumplir con las exigencias de salud y seguridad de la sociedad actual.

En esta dirección, una alternativa ha sido el desarrollo de estructuras ligeras, siendo las tensadas, las que han dado mayor aporte al diseño de

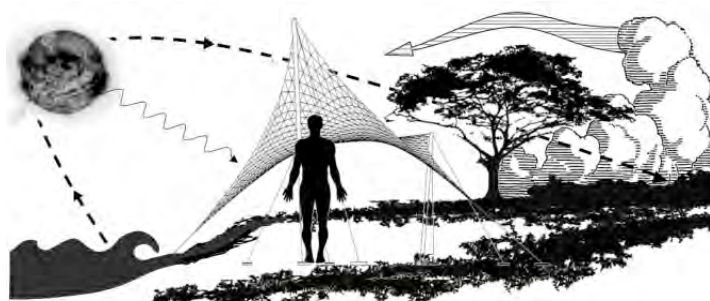


Fig. 1: Grafico conceptual: Tenso estructura y elementos climáticos

Fuente: El Autor



Fig. 2: Foto, Cubierta tensil temporal, Universidad de Costa Rica, 2010  
Fuente: El Autor

sistemas constructivos más eficientes. Las tenso estructuras posibilitan, por su naturaleza textil, flexible, liviano, adaptable y además por su alta resistencia a fuerzas de tracción; la construcción de grandes luces con un mínimo de material empleado. Estas características son ideales para las condiciones climáticas tropicales, en las cuales es esencial la protección de los espacios de actividad humana de la radiación solar y las fuertes precipitaciones. El estudio riguroso y metódico de las condiciones y factores climáticos tropicales, en específico de los trópicos húmedos, es necesario para identificar las variables de mayor influencia y predominancia para el planteamiento de criterios de diseño bajo las cuales se obtenga un mayor impacto positivo sobre el confort del usuario y su entorno.(Fig.2)

En consecuencia, cálculos informáticos y simulaciones de la estructura toman un papel importante en este proceso, ya que permiten predecir su posterior comportamiento, como por ejemplo, ante el clima y los gastos energéticos y materialísticos necesarios para construir, mantener y desmantelar la estructura. La preocupación sobre los aspectos ambientales, alertados por la creciente dependencia energética y el cambio climático a nivel global, viene a ser el principal motor de motivación para la exploración y consecuente propuesta de pautas de diseño bioclimático para las tenso estructuras.

**Desarrollo:** El clima tropical, ubicado entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, zona geográfica entre la lat. 23.5° norte y sur desde el Ecuador y, en específico, el Trópico Húmedo el cual es descrito por Köppen, mencionado por Pettersen (1969), como una Selva con *“temperatura mensual mayor a 18°C, lluvia significativa durante gran parte del año”*, este concepto también es ampliamente estudiado por Herrera y Holdridge, y es el predominante en muchas regiones de Costa Rica bajo el dominio de la zona de convergencia intertropical que define los regímenes de precipitación de la vertiente del Caribe y Pacífico, divididas por las topografías de la cordillera volcánica e influenciadas por los vientos alisios y la condición continental impuesta por mares y océanos (<http://www.imn.ac.cr>). (Fig.3, Fig.4)

Según Rafael Serra (2004), los trópicos húmedos, o zonas cálidas-húmedas, reúnen características generales que presentan temperaturas altas pero constantes, resultado de la intensa radiación solar. Los niveles de humedad relativa son igualmente altos, nubes y fuertes precipitaciones son frecuentes, especialmente durante la estación lluviosa del año.

Estas características tienen implicaciones sobre el bienestar del ser humano, el cual percibe calor y “bochorno” que hacen reaccionar al cuerpo con mecanismos de enfriamiento propio, como la transpiración capilar, la sudoración, aprovechando de esta manera las brisas para la evapotranspiración, la cual extrae energía térmica del cuerpo hasta encontrar un equilibrio térmico entre metabolismo y condiciones ambientales, lo cual se denomina “confort higro-térmico” lo que significa que “no sentimos ni calor ni frío” (Gonzalo, 2003)



Fig. 3 Zonas climáticas y Franja Tropical,

Fuente: Koeppen Adaptado

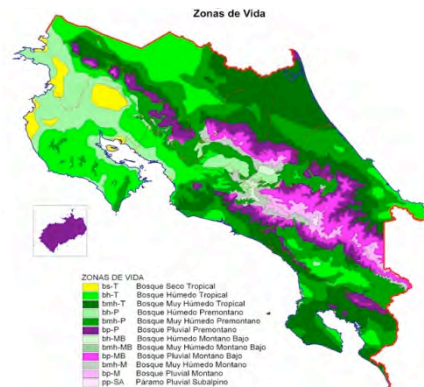


Fig. 4 : Zonas de vida de Costa Rica, L. R.Holdridge

Fuente: Centro Científico Tropical

El cálculo de esta condición especial está ampliamente desarrollado y fundamentado bibliográficamente y en programas informáticos especializados.

Pero cuando el cuerpo por sus propios medios no logra equilibrarse térmicamente, por las circunstancias extremas del clima en épocas u horas críticas, podemos intervenir y manipular esta relación para lograr el confort mediante el manejo de pieles, cobijos y cubiertas.

A través de la historia gran parte del éxito adaptativo de la humanidad a diferentes ámbitos inhóspitos dependió de esta comprensión. Es en la arquitectura vernácula donde más directamente se pueden estudiar este tipo de conceptos de adaptación climática o bioclimática. A partir de aproximaciones empíricas se han distinguido en la arquitectura popular de las regiones subtropicales ciertas características generales como la ligereza, eficiencia en ventilación y protección en todas las direcciones de la radiación. Los edificios son volumétricamente estrechos, alargados y se separan entre sí y del suelo para mejor exponerse a las brisas. Los cerramientos se componen de materiales de inercia térmica baja y prácticamente se desmaterializan con aperturas y tamices múltiples para mejorar la ventilación. Las cubiertas son extensas y elevadas protegiendo con grandes aleros los cerramientos laterales de la radiación solar (Serra, 2004). (Fig.5 y 6 )

Frei Otto reclama para el futuro, una arquitectura más ligera, energéticamente más económica, con mayor movilidad y adaptabilidad, es decir estructuras más naturales y livianas, como son las tensiles, los cascarones y las neumáticas; así mismo, demanda más versatilidad y movilidad y alta eficiencia, uniendo tanto aspectos estéticos como éticos. La arquitectura del mañana, según la visión de Otto, será otra vez minimalista, una arquitectura concebida bajo procesos de autogeneración y auto optimización (Otto, 1965).

Las tenso estructuras por su infinita variedad de formas logran adaptarse básicamente a cualquier tipo de clima, favorecido por sus características materiales de baja inercia térmica y excelente comportamiento ante la radiación solar. El sombreado de fachadas con cubiertas textiles puede bajar considerablemente la ganancia térmica de los edificios por radiación solar. Las tenso estructuras sin cerramientos laterales permiten ventilación cruzada y enfriamiento pasivo. En climas calientes y húmedos son importantes también los aleros holgados para la protección de las excesivas lluvias, además que se vuelve importante el uso del efecto venturi. Bajo estas condiciones la membrana debería ser impermeable pero permitir el flujo continuo de brisas a través de membranas traslapadas y conoidales que actúan como chimeneas de ventilación (Goldsmith, 2004).

“La Guía europea de diseño para tenso estructuras”, también hace referencia a estas mismas características, y establece además, una serie de criterios y metodologías para el diseño formal y estructural de las membranas tensiles, que incluye además el desarrollo del comportamiento climático. Su autora resume el comportamiento climático adaptativo de las tenso estructuras y propone posibles respuestas teóricas y constructivas en el documento “Aspectos ambientales de la arquitectura tensil” (Mollaert. 2003).



Fig. 5 : Foto, Vivienda indígena actual, Costa Rica

Fuente : Fonseca



Fig. 6 : Foto, Vivienda playa Garza, costa pacífica, Costa Rica, 2011

Fuente : El Autor

A pesar de las diferencias climáticas entre los sitios de estudio, son aplicables igualmente algunas estrategias pasivas en los trópicos, con la necesidad de adaptación al medio.

A continuación, se analizarán tres de los factores climáticos más importantes para el confort higrotérmico, en relación a las regiones del Trópico Húmedo y las estructuras tensadas, con el fin de establecer pautas de diseño como respuestas ante la interacción entre clima, estructura/envolvente y el hombre como ente metabólico.

**Sol.** El sol es el centro gravitacional y fuente energética primaria del sistema solar, al cual pertenece la Tierra. Sin su aporte energético el planeta sería totalmente inhóspito. La cantidad de energía incidente sobre la superficie terrestre, depende de la traslación elíptica y anual de la tierra y su respectiva posición con respecto al Sol. También, influye la rotación axial propia de la tierra, que genera calentamiento e iluminación desigual en ciclos de veinticuatro horas, los cuales percibimos como día y noche, y que rigen los periodos de actividad metabólica de toda la naturaleza terrestre. (Fig.7)

El eje de rotación de la Tierra tiene una inclinación axial de  $23.5^\circ$  que desfasa la perpendicularidad de la zona ecuatorial con respecto a los rayos solares, lo que, en suma, con el movimiento de traslación anual, provoca un desfase latitudinal de la incidencia de radiación, cuyo efecto percibimos como estaciones climáticas. En el caso de los trópicos húmedos se presenta como estación seca y estación lluviosa, las cuales tienen elementos climáticos específicos: viento, precipitación, temperatura. (Fig. 8)

Dada la importancia del Sol para el clima y el confort humano, es indispensable el control de este factor, siendo la geometría solar la herramienta precisa para poder calcular y predecir, a través de la carta solar, el heliodón o programas informáticos, la posición exacta del sol con respecto a la Tierra (Acimut, Altura Solar) para cualquier punto geográfico a toda hora del año, con en el fin de controlar ganancias o pérdidas térmicas de la estructura que inciden directa o indirectamente sobre el confort de sus usuarios.

La relativa perpendicularidad de los rayos solares que inciden sobre las latitudes tropicales (Costa Rica, lat.  $10^\circ$  Hemisferio Norte) implica una radiación solar intensa (Costa Rica,  $3.5 - 4.0$  kWh/m<sup>2</sup>/día radiación normal directa- anual, Instituto Meteorológico Nacional) que acelera la evaporación y los procesos termodinámicos. En consecuencia, el porcentaje de nubosidad, vapor de agua y otras partículas suspendidos en la atmosfera es alto, por lo cual reducen la intensidad de la radiación durante la estación lluviosa filtrando los rayos solares. (Viqueira, 2001).

Las estrategias básicas para la protección ante las radiaciones solares, en el caso de los trópicos, son también las más efectivas: el estudio de la carta solar específica de la localidad, cálculo de la orientación óptima sobre el eje este-oeste, para ofrecer a las incidencias solares

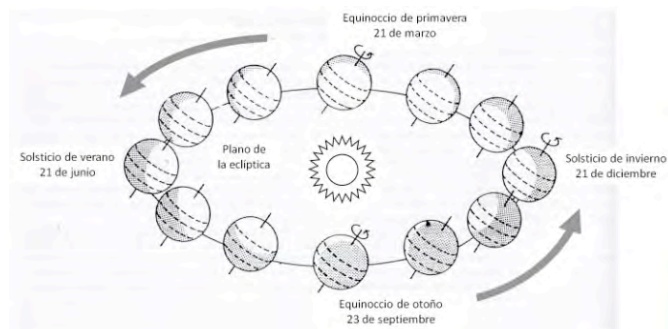


Fig. 7 : Movimientos característicos de la tierra

Fuente: Lacomba

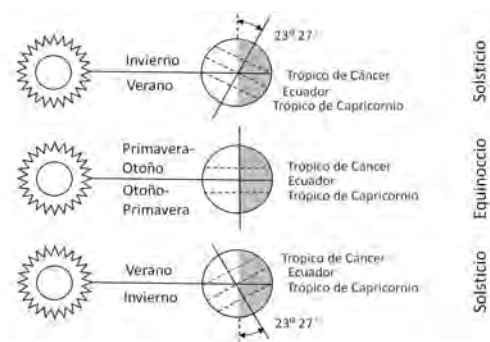


Fig. 8 : Geometría Solar

Fuente: Lacomba

de mañana y tarde, más difíciles de controlar por su perpendicularidad con respecto a los cerramientos, las fachadas de menor superficie. También el cálculo de la proyección de aleros se vuelve esencial para alcanzar una protección óptima del espacio interior en las horas más críticas del día. (Fig.9)

Un método para identificar estas horas críticas del día consiste en traslapar la carta solar estereográfica con la información del gráfico de Isopletas, derivada del CBA (Climograma de Bienestar Adaptado, Neila, 2004) que permite relacionar los ángulos solares (Acimut, Altura Solar) con los índices de confort, horario y anual, con la radiación solar, humedad y ventilación. En este sentido, el componente más importante es la radiación, porque se relaciona directamente con la temperatura del aire. Con esta información disponible es relativamente fácil diseñar la estructura con mucha eficiencia y precisión para que el espacio interior de la estructura esté protegido en las horas más críticas del día.(Fig.10)

El tema de la geometría solar (sombreamiento efectivo) repercute más que todo en la orientación y forma de la estructura mientras el material en sí, la lona, se relaciona con la transferencia del calor. La lona es una membrana compuesta por tejidos sintéticos con características de resistencia estructural, cubiertas por capas de polímeros que agregan cualidades de impermeabilidad, color y transparencia. Las membranas no miden más que milímetros en sección y mantienen un ratio de peso por metro cuadrado relativamente bajo (500-1500kg/m<sup>2</sup>) en comparación con otros materiales. Posee como cualidad física un índice de capacidad térmica, y consecuentemente, una inercia térmica muy baja, lo que conviene para los trópicos húmedos, ya que el material y las masas de aires adyacentes se calientan muy rápidamente, pero de la misma forma se enfrían, tal como mencionan algunos autores de la bioclimática como Gonzalo, Serra, Viqueira, Germer, Ugarte y Neila.

La transferencia de calor ocurre a través de tres procesos básicos: radiación (transferencia de energía por ondas electromagnéticas), convección (transferencia de calor entre líquidos y gases) y conducción (transferencia de calor por actividad molecular que ocurre básicamente en la materia sólida). Este flujo de calor  $Q_c$ , inducido por las diferencias de temperatura interior-exterior, está directamente relacionado a la conductividad  $K$  (relacionado a la densidad del material), del espesor  $b$  y la temperatura superficial  $t$  del material (Lacomba, 1991). Al tratarse la lona de un material de espesor milimétrico su resistencia al calor es prácticamente despreciable y con un valor  $U$  (transmitancia térmica= $W/m^2K$ ) muy alto comparado con otros materiales de pocos milímetros.

Mollaert (2004) igualmente opina que la resistencia térmica de las membranas es muy baja, sobre todo por su grosor reducido, por lo que conviene concentrarse en los otros dos factores de transferencia de calor: radiación y convección.

Algunos materiales ofrecen diferentes graduaciones de translucidez sin embargo, hay que

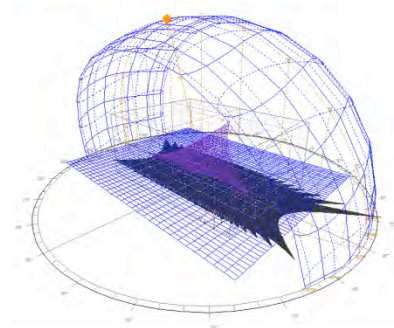


Fig. 9: Proyección diaria de sombras de una membrana Fuente: Autor

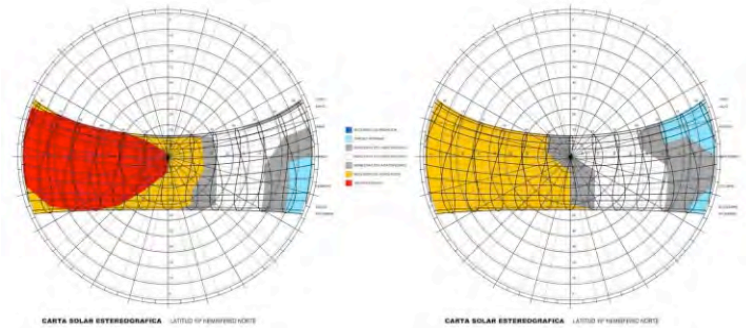


Fig. 10: Carta solar informada con isopletas generados por cálculos del CBA

Fuente: Autor.



Este comportamiento dinámico se debe, básicamente al hecho de que el viento es un fenómeno derivado de la energía solar:

“La acción del sol y el movimiento de rotación e inclinación del eje terrestre, dan lugar a la presencia del viento en la tierra. El viento es aire en movimiento que se genera por las diferencias de presión y temperatura en la atmosférica, causado por un calentamiento no uniforme de la superficie terrestre, ya que mientras el sol calienta aire, agua y tierra de un lado del planeta, el otro lado se enfría a causa de la radiación nocturna hacia el espacio. Este calentamiento desigual de la atmosfera origina movimientos de aire compensatorios que tienden a reducir la diferencia horizontal de temperatura en función de la latitud. Por tanto, en las regiones ecuatoriales la superficie de la tierra recibe más energía solar que la que irradia de regreso al espacio, y por ello actúa como una fuente de calor para el aire de estas regiones” (Chávez, 2005).

A una escala menor se dan los efectos de vientos regionales y locales provocados por las condiciones topográficas, la rigurosidad de terreno y la altura. Los vientos regionales pueden ser aprovechados para la adecuada ventilación de la estructura.

Por ejemplo, las brisas de montaña y valle, generadas por el desfase de calentamiento de la superficie de la montaña y el desplazamiento de masas de aire durante el día, provocan así una brisa ascendente. Durante la noche se da el efecto inverso. (Fig.14)

Otro ejemplo, son las brisas de mar-tierra que se producen por el desfase de calentamiento entre los sólidos y líquidos. De esta forma, el suelo se calienta más rápidamente en horas del día, elevando la temperatura del aire cercano a la superficie, que pierde densidad debido a su expansión. El aire caliente sube a estratos más altos y es reemplazado por aires provenientes del mar. Este mecanismo crea un efecto de circulación de masas de aire con dirección mar-tierra que se invierte en horas de la noche. (Chávez, 2005). (Fig.15)

Las estructuras tensiles se conforman por elementos estructurales que trabajan a compresión y flexión como mástiles y arcos, pero su naturaleza tensil (elementos que trabajan a tracción) se manifiesta en la lona (y en cables) con características de tejido y membrana, impermeables y flexibles. Por su ligereza, (aprox. 1000 g/m<sup>2</sup>; [www.ferrari-textiles.com/](http://www.ferrari-textiles.com/)) flexibilidad y relativamente gran área de cobertura son muy sensibles a las cargas de viento y fuertes ráfagas o turbulencias, éstas pueden fácilmente deformarla momentáneamente, lo que debe ser un factor de consideración en el diseño de los detalles/estructura/membrana y establecimiento de factores de seguridad, porque tienen que responder flexiblemente a esta deformación sin perder su integridad estructural o sobrepasar su capacidad límite de resistencia. La capacidad de resistir las cargas de viento y evitar mayores deformaciones está directamente relacionada a la geometría anti clástica de estas superficies y el grado de pretensión que se le aplica a la lona (Mollaert, 2004). Las corrientes de aire que más afectan

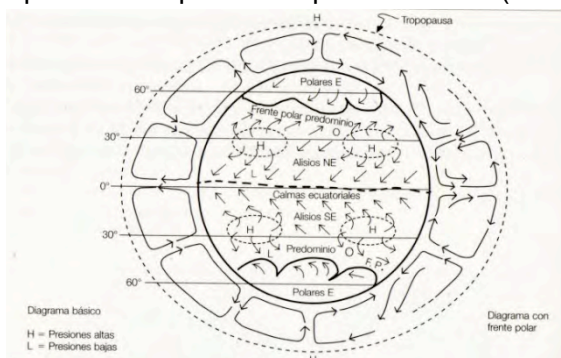


Fig. 13: Sistema de circulación atmosférica Hadley

Fuente: Chávez

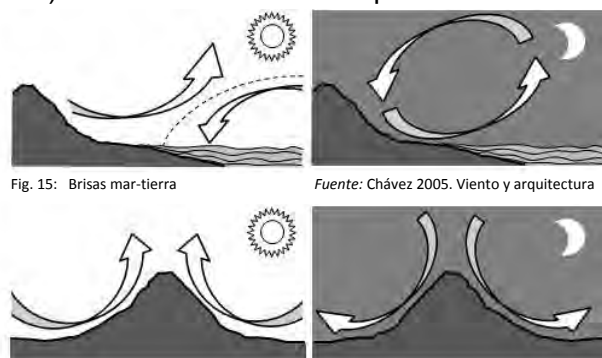


Fig. 15: Brisas mar-tierra

Fuente: Chávez 2005. Viento y arquitectura

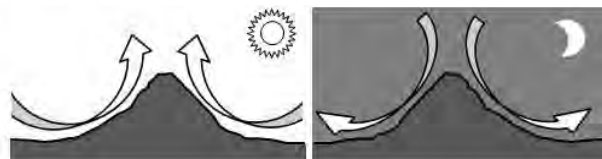


Fig. 14: Brisas valle-montaña

Fuente: Chávez 2005. Viento y arquitectura

las tenso estructuras son las laterales y ascendentes, por lo cual se hace indispensable realizar simulaciones y cálculos para identificar cargas, axiales, rangos de deformación, momentos y reacciones en los vértices. También es de interés particular un análisis de las presiones positivas y negativas, velocidad y vectores de flujo, en un túnel de viento para determinar eventuales problemas de embolsamiento de aire o dificultades de ventilación por desaceleración de los flujos de aire, que pueden tener, igualmente efectos sobre el equilibrio estructural como sobre el confort higrotérmico de los usuarios que se encuentran en el interior. (Fig.16)

Para lograr el bienestar térmico en los trópicos, sin máquinas de acondicionamiento, el viento es el recurso indispensable para este fin. El movimiento de aire está en directa relación con los niveles de humedad y juega un papel importante en la efectividad de evapotranspiración de los usuarios. Tanto así que “Las tablas de Mahoney” recomiendan para los trópicos húmedos el aprovechamiento máximo del viento para ventilar espacios interiores y también en el cálculo de diagramas psicrométricos (Givoni, 1969) la ventilación es la estrategia pasiva más eficiente, basado en los dos siguientes fenómenos. El primero es el efecto directo del viento sobre la superficie de piel de los usuarios, induciendo la evapotranspiración, mientras que el segundo, es el efecto de reemplazamiento de las masas de aires calientes en el interior de la estructura por masas de aires exteriores, más frescos. (Fig.17)

Los principios más apropiados para tal fin son:

- la ventilación cruzada (evita cerramientos laterales excesivos y respetando profundidades de planta menores)
- el efecto Venturi (la manipulación de la geometría de la estructura a favor del efecto Venturi puede provocar aceleramiento de los vientos y lograr una más efectiva ventilación).
- el cálculo riguroso de proporciones de tamaño de aperturas y salidas con relación al volumen de aire interior.
- el efecto Stack o efecto chimenea (el aire interior de la estructura se calienta, pierde densidad y se eleva hasta el punto más alto de la estructura, de menor a mayor presión, donde se evacua por una apertura o monitor, que se succiona por los vientos predominantes exteriores y las presiones negativas que se generan en la sombra de viento de la membrana).

**Lluvia.** Las fuertes y frecuentes precipitaciones y tormentas representan uno de los factores climáticos que mejor caracteriza los trópicos húmedos. Los acelerados ciclos de evaporación y precipitación, inducidos por la intensa radiación solar, son factores importantes para explicar la biodiversidad de la naturaleza en estas latitudes, donde es abundante y exuberante la flora y fauna.

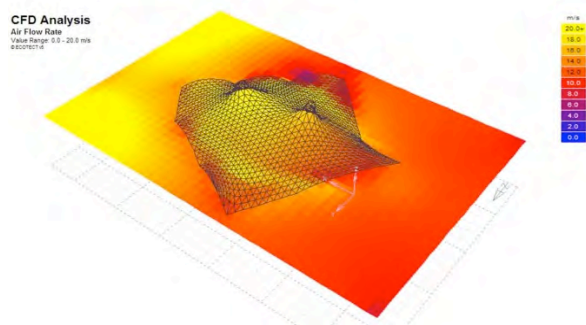


Fig. 16: Diagrama: Velocidad de flujos de aire

Fuente: Autor

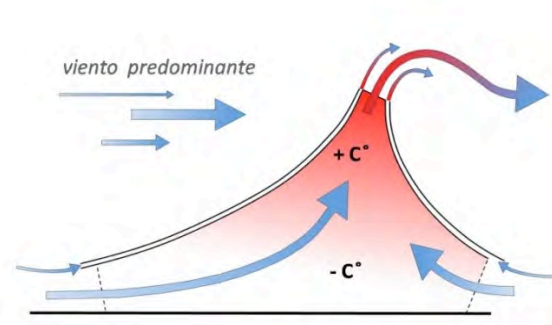


Fig. 17: Diagrama adaptado: Efecto Stack

Fuente: Mollaert



Es difícil de encontrar patrones generales del comportamiento climático para una región tan amplia y diversa como son los trópicos. En realidad, existen muchos climas en esta zona (Köppen), y en el caso de Costa Rica tampoco es menos complejo el escenario (Holdridge) ya que son muchos los factores que influyen:

- *el relieve (la disposición de las montañas, llanuras y mesetas)*
- *la situación con respecto al continente (condición istmica)*
- *la influencia oceánica (los vientos o las brisas marinas, la temperatura de las corrientes marinas)*
- *la circulación general de la atmósfera*
- *la interacción de factores geográficos locales, atmosféricos y oceánicos*

(<http://www.imn.ac.cr>)

Costa Rica recibe anualmente entre 1.500 a 6.000 mm de lluvia, niveles elevados comparándolos con latitudes más alejadas al Ecuador (Uruguay: 1000-1600 mm anual, Dirección Nacional de Meteorología, [www.meteorologia.gub.uy](http://www.meteorologia.gub.uy)); sin embargo, el rango tan amplio de las precipitaciones muestra una gran variabilidad del clima en Costa Rica que se refleja en los mapas climatológicos del Instituto Meteorológico Nacional (<http://www.imn.ac.cr>), (Fig.18, Fig.19), el cual divide la superficie de este país en siete regiones climáticas (Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Región Central, Zona Norte, Región Caribe Norte y Región Caribe Sur) que se rigen por los regímenes de influencia del Pacífico y del Caribe, separados transversalmente por una cordillera volcánica. La descripción y definición rigurosa de estas regiones climáticas excede el marco de estudio de este trabajo, sin embargo, para la generación de pautas de diseño “el conocimiento de la precipitación anual no basta para propósitos de diseño, ya que es igualmente importante conocer cuando cae lluvia (periodo durante el día o el año), y como cae (tormentas violentas, lloviznas)” (Germer, 1983).

De este modo se resumirá del texto “Estrategias pasivas para Costa Rica” de Germer, el ciclo de lluvias anuales de Costa Rica con el propósito de ser reconsiderado y comparado con otros sitios geográficos que estén igualmente ubicados sobre la franja tropical, haciendo énfasis en la necesidad de estudiar las particularidades climáticas únicas de cada sitio:

-Distribución anual: la lluvia generalmente cae en la vertiente del Atlántico durante todo el año, y en la vertiente del Pacífico durante los meses de mayo a diciembre. La variación más pronunciada tiene lugar en septiembre-octubre cuando la zona del Pacífico recibe sus máximos anuales, mientras que la zona del Atlántico recibe una cantidad promedio moderada.

-Distribución diurna: las zonas con influencia predominante de los sistemas del Pacífico, reciben la mayor parte de la lluvia durante las horas de la tarde, siendo las 15h.00 cuando se alcanza el máximo. Las áreas influenciadas por el Atlántico reciben la mayor parte de la lluvia durante la noche, sin tener una hora específica de mayor auge que pueda presumirse. (Germer, 1983)

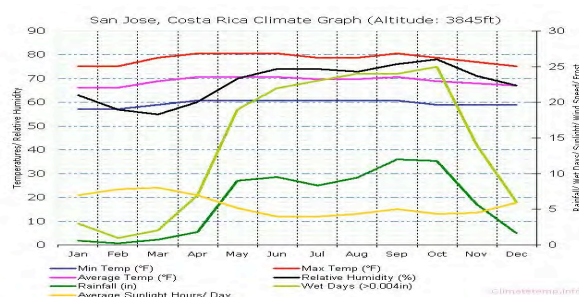


Fig. 18 Climograma, San Jose, Costa Rica

Fuente : IMN

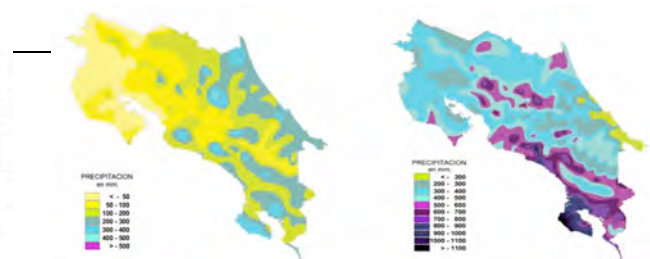


Fig. 19 Mapas de precipitación mensual, Abril y Octubre, Costa Rica

Fuente: IMN

También hay que tomar en cuenta que el territorio costarricense se encuentra en el área de influencia de los huracanes los cuales se originan en los sistemas de baja presión. Los ciclones tropicales y huracanes, se forman durante los meses de junio hasta noviembre en las tibias aguas del mar Caribe. Aunque Costa Rica no ha sido cruzada directamente por un huracán hay que tomar en cuenta su destructiva influencia, con velocidades de viento superiores a los 118 m/s, y fuertes lluvias que pueden provocar severas inundaciones, derrumbes o deslizamientos. Definitivamente, este tipo de eventos extremos significan un riesgo para las tenso estructuras y deben ser considerados en los cálculos de factores de seguridad estructural.

Algunas tipologías de estructuras tensadas siguen el concepto funcional de la “sombrialla”, concepto popularizado por Frei Otto en los años 70 en proyectos como los paraguas adaptados para la mezquita de Medina. La tipología de estas formas orgánicas y la condición de flexibilidad, tensión e impermeabilidad dan sostén a esta conceptualización que puede ser comparada desde la movilización de tribus nómadas en el uso de tiendas como viviendas portables ante la necesidad de desplazamiento para mayor aprovechamiento de los recursos de caza y colección de vegetales, directamente relacionados con los cambios estacionales del clima. (Kronenburg, 2002)

Ante la condición de precipitaciones fuertes, en algunas zonas del país durante todo el año, el objetivo principal es brindar la mayor protección para que las actividades humanas se puedan desarrollar en espacios amplios y abiertos, y a la misma vez puedan prever la máxima protección ante la lluvia. Al tratarse de membranas que solamente trabajan a tracción y reaccionan muy limitadamente a cargas verticales, si se llegara a acumular agua por la geometría de diseño o imperfecciones constructivas en alguna parte de la membrana, ella cedería ante el peso de ésta y se deformará creando una depresión topográfica sobre su superficie, la cual recogería más agua aún. Por lo tanto, esta situación requiere especial atención y análisis de las curvaturas de la superficie para identificar áreas de pendiente crítica. Cuanta más pendiente, más rápido se evacua el agua y menor será el riesgo de emposamiento; en caso contrario, se podría dañar la membrana por estiramiento excesivo o llegar, en un caso extremo, al colapso de la estructura bajo el peso del agua acumulado. (Fig.20)

El desagüe se resuelve por medio de la gravedad, porque el agua busca el camino más corto hacia abajo, de tal manera que los anclajes y cables de vértices se convierten en “bajantes” con caídas libres cuando hay exceso de agua. Existen sistemas de “canoas” de borde/relinga o desagües integrados a la estructura metálica, no obstante, son soluciones altamente sofisticadas que bajo los elevados volúmenes de lluvia de los trópicos no llegan a cumplir satisfactoriamente su función. (Fig.21)

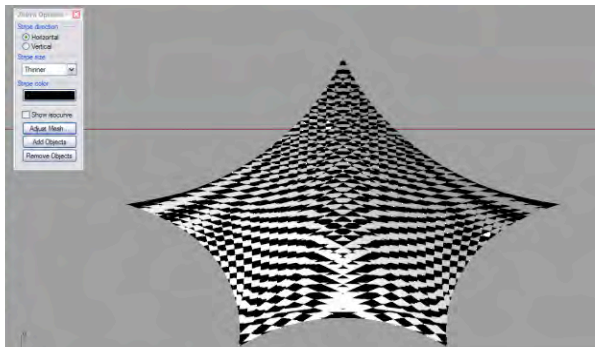


Fig. 20 Isocurvas

Fuente: Autor

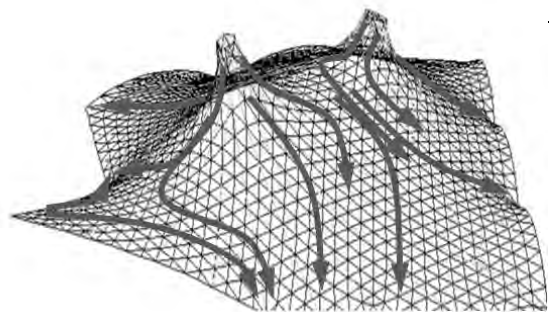


Fig. 21 Curvatura y desagüe

Fuente: Autor

Cuando la precipitación aparece en combinación con fuertes vientos laterales se pueden dar condiciones de lluvia casi horizontales, en estos casos se hace indispensable la prevención con aleros de dimensiones generosas para proteger el espacio interior. También, son comunes los cerramientos laterales livianos, operables o retractiles que permiten la protección ante la lluvia pero que no impidan la ventilación del interior. Otra solución es aprovechar la adaptabilidad formal de las tenso estructuras y modelar una cubierta hasta convertirla en cerramiento lateral, con el correspondiente criterio climático.

**Conclusiones.** El clima es uno de los sistemas naturales más complejos que conocemos, y la capacidad humana de adaptarse a ello ha decidido históricamente sobre el destino de algunas culturas. El catalizador para mitigar los efectos del clima ha sido en este sentido la arquitectura, siendo despojado, en los últimos siglos de desarrollo industrial, de sus funciones primarias por los avances tecnológicos en máquinas de acondicionamiento ambiental, reforzado por la facilitación de recursos y energía barata, con una aparente, infinita disponibilidad para operarlos. Sin embargo, los recursos se están agotando y el retorno a un aprovechamiento de energías renovables con estrategias pasivas, bioclimáticas de las condiciones ambientales, específicamente, de las climáticas, se hace indispensable. Se requieren herramientas de análisis, modelos y sistemas constructivos innovadores para poder responder a esta necesidad con sensibilidad, flexibilidad y eficiencia para alcanzar los máximos beneficios, en términos de confort, con los mínimos recursos en términos energéticos.

Las estructuras tensadas pueden cumplir, bajo el empleo de las mejores prácticas, con estas exigencias y proveer condiciones de confort higrotérmico para el ser humano. Sin embargo, es necesario estudiar también las características y propiedades de las tenso estructuras para poder establecer rangos y pautas de comportamiento ante el clima, para no evocar expectativas demasiadas altas. Con base en experiencia, herramientas adecuadas y análisis precisos se puede lograr un sistema integral de altísima eficiencia entre clima, estructura y el ser humano.

El problema metodológico que repercute en la práctica, consiste en la complejidad del clima, que aumenta dependiendo de la escala de observación hasta llegar a verdaderos microclimas. Así que es demasiado pretensioso el intento de establecer pautas generales de diseño para los trópicos húmedos globales, dentro de las cuales se encontraran una infinidad de variaciones con características locales muy específicos que no permiten la generalización de condiciones climáticas y por ende requiere reflexión sobre el empleo de las estrategias bioclimáticas más adecuadas en cada sitio particular.

No obstante, mediante este trabajo se presentaron aquellas características y propiedades de las tenso estructuras que pueden ser potencialmente empleados para modificar las condiciones de confort de los espacios en un ambiente tropical húmedo específico, con el único recurso del clima mismo y el potencial creativo del diseño. Aun cuando este análisis se realizó cualitativamente, se requiere más profundidad y detalle para extraer realmente información y valores cuantitativos que puedan ser empleados en los programas de simulación y diseño.

## **Bibliografía**

Chávez, J.R. García., Freixanet, V.F., 2005. Viento y arquitectura: el viento como factor de diseño arquitectónico. 3ª. Ed. México

Fallas, C. J. , Sojo. 2010. Antología. Curso: Fenómenos Atmosféricos. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.

Fonseca, E.C., y otros, 1998. Historia de la Arquitectura en Costa Rica. San Jose. Costa Rica

Germer, J. L.. 1983. Estrategias pasivas para Costa Rica. Heredia. Costa Rica

Givoni, B., 1969. Man, Climate & Architecture. 2ª ed. . Building Research Station Technion, Israel Institute of Technology. Israel.

Goldsmith, N. . 2004. Climate Effects on Light-weight Structures as a Design Tool. FTL Design Engineering Studio, New York. Estados Unidos

Gonzalo, G. E. . 2003. Manual de Arquitectura Bioclimática. Tucuman. Argentina

Herrera, W.. 1985. Clima de Costa Rica . San José. Costa Rica.

Holdridge, L. R.. 1987. Ecología basada en zonas de vida  
Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José. Costa Rica.

Kronenburg, R.. 2002. 2ª ed.. Houses in Motion, the genesis, history and development of the portable building. Wiley Academy. Gran Bretaña.

Lacomba, R.. 1991. Manual de Arquitectura Solar. México D.F. . México.

Mollaert, M.. 2003. Environmental aspects in textile architecture. Vrije Universiteit. Brussel.

Mollaert, M. , Forster, B. . 2004. European Design Guide for Tensile Surface Structures. Tensinet. Union Europea

Neila, F. J., González. 2004. Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible. Madrid. España.

Otto, Frei. 1965. Estructuras (Spannweiten). Conrad Roland. Berlin. Alemania

Petterson, Sverre. 1969. Introduction to Meteorology. Massachusetts Institute of Technology. Estados Unidos.

Serra, R. 2004. Arquitectura y Climas. 4ª ed.. Barcelona. España.

Ugarte, J.. 2004. Guía Bioclimática, construir con el clima. Instituto Tropical. San José. Costa Rica.

Viqueira, R.. 2001. Introducción a la Arquitectura Bioclimática. México D.F. .