

XXV CONGRESO ORDINARIO DE COLEGIOS DE ARQUITECTOS DE BOLIVIA
“ARQ. JUAN RAMON ARANCIBIA”

ARQUITECTURA RESILIENTE EN TIEMPOS DE PANDEMIA

Sistemas Pasivos bajos en carbono como estrategia post-COVID para la renovación del aire interior en edificaciones en la ciudad de Santa Cruz: Estudio de caso Plan de Vivienda Social.

Autores: Carrera de Arquitectura y Sociedad de Investigación Científica Estudiantil de Arquitectura (SICEA)

Universidad Católica Boliviana “San Pablo” sede Santa Cruz

Gabriela Ismael (SICEA)

Katherine Gonzales (SICEA)

Alison Guzmán (SICEA)

Jaime San Martín (Arquitectura – UCB)

César Pérez (Arquitectura - UCB)

Contacto: Arq. Adriana Navarro

Directora de Arquitectura

Universidad Católica Boliviana “San Pablo” sede Santa Cruz

lnavarro@ucb.edu.bo

(+591) (3) 3442999 Interno 229

(+591) 78456078

I. INTRODUCCIÓN

La pandemia del COVID-19 nos ha ayudado a recordar la importancia de valorar las cosas simples, pero a la vez también las más importantes de la vida. Desde la producción de alimentos en huertos urbanos hasta la necesidad de respirar aire limpio y renovado con la menor huella ambiental.

Es innegable que existe una relación directa entre el mayor uso de energía eléctrica y la menor renovación de aire entre el interior y el aire libre del exterior (EPA, 2021; Sant'Ana et al., 2020). Esto, por la mayor dependencia en sistemas de refrigeración de aire acondicionado para mantener el confort térmico al interior de las edificaciones (La Roche, 2010).

Al mismo tiempo, también existe evidencia de una relación directa entre mayor exposición al virus en interiores y una limitada ventilación con el aire libre del exterior (Sant'Ana et al., 2020). En consecuencia, a mayor uso de aires acondicionados, mayor uso de energía, mayor la huella de carbono, y mayor las probabilidades de exposición al virus del COVID-19. Esto especialmente en ciudades tropicales altamente dependientes de sistemas de aire acondicionado y energía a partir de combustibles fósiles para alimentarlos (La Roche, 2010).

La huella de carbono anual de la ciudad de Santa Cruz es de aproximadamente 3.7 millones de toneladas de CO₂e, la huella de carbono per cápita es de 2.5 t CO₂e, lo que equivale a un consumo energético per cápita de 1012 kWh o el equivalente a quemar 233 litros de gasolina por año por persona (Servicios Ambientales S. A., 2017). Del total de la huella de carbono de Santa Cruz, el sector que más contribuye es el transporte (51 %), seguido de la generación de residuos (19%), luego los sectores residencial, comercial e institucional aportan con el 17%, y finalmente el sector industrial con 13 % (Servicios Ambientales S. A., 2017).

Las elevadas temperaturas que se incrementan con los años en la ciudad de Santa Cruz ocasionan cada vez mayores demandas de energía eléctrica para el uso de aire acondicionado, ventilación y refrigeradores rompiendo cada año nuevos records históricos (El Deber, 2020; Toledo, 2019). El 2017, debido a las altas temperaturas se registró una demanda de electricidad de 627 MW en días de verano, sin embargo, el mes de noviembre de 2019 cuando la temperatura superó los 36 grados centígrados el consumo se disparó a 651 MW a partir de las 15:00 horas (Toledo, 2019). Un nuevo record fue alcanzado el 2020 cuando el mes de enero la demanda subió a 692 MW y nuevamente en octubre se registró un pico elevado de 681 MW (El Deber, 2020).

En respuesta a este fenómeno que requiere altas cantidades de energía y que pone en riesgo la salud de usuarios en interiores e incrementa los riesgos atribuibles al cambio climático, la Sociedad de Investigación Científica Estudiantil de Arquitectura (SICEA) está produciendo un manual dirigido a arquitectos, diseñadores y constructores para promover diseños pasivos bajos en carbono (Kamal, 2012b; Yin et al., 2013) que a la vez maximicen el intercambio de aire entre los interiores de las edificaciones y el aire libre del exterior en ciudades tropicales como Santa Cruz de la Sierra.

En base a algunos capítulos de este manual, se propone para este congreso un análisis específico de la implementación de sistemas pasivos en el modelo de vivienda del Plan de Vivienda Social de Bolivia (Ministerio de Obras Públicas, 2020), como una medida para la renovación de aire fresco en interiores en tiempos de pandemia y cambio climático en ciudades tropicales.

II. METODOLOGÍA

El análisis se enfocó en el modelo de vivienda social que es una tipología de referencia que puede ser encontrada en todo el país casi sin ninguna modificación arquitectónica respecto al diseño patrón. Los planos y diseños se descargaron del portal oficial del ministerio (Ministerio de Obras Públicas, 2020) y se consideró un número de cuatro personas por familia en base a datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2021). Para este análisis se siguieron cuatro pasos:

a. **Energía para Enfriamiento e Índice de Cambio de Aire por Hora (ACH)**

Para determinar la cantidad de energía en kWh demandada para mantener el confort térmico en el interior de la vivienda con el clima de la ciudad de Santa Cruz, se aplicaron las siguientes fórmulas en el diseño de vivienda social:

(Eq. 1) Cálculo de acristalamientos: $Q_{SR} = S \cdot R \cdot F$

Donde:

Q_{SR} = Calor en watts (W)
 S = Superficie (m^2)
 R = Radiación solar (W/m^2)
 F = Factor de corrección

(Eq. 2) Cálculo de transmitancia térmica en revestimientos y cerramientos:

$$Q_{SRT} = K \cdot S (T_{ec} - T_i)$$

Donde:

Q_{SRT} = Calor en watts (W)
 K = Coeficiente según material ($W/m^2/^\circ C$)
 S = Superficie del muro (m^2)
 T_{ec} = Temperatura externa ($^\circ C$)
 T_i = Temperatura de confort térmico al interior ($^\circ C$)

(Eq. 3) Cálculo del calor latente y sensible desprendido por persona.

(Eq. 4) Carga sensible por aparatos electrónicos y equipos: $Q_s = \sum n \cdot P$

Donde:

Q_s = Calor sensible por aparatos (W)
 n = Número de aparatos eléctricos y equipos
 P = Potencia (W)

El Cambio de Aire por Hora (ACH) es la medida del volumen de aire de un espacio definido que es removido o renovado en una hora (Rhode Island Department of Health, 2021). Según recomendaciones de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE en inglés), el Cambio de Aire por Hora de hogares, tiendas, oficinas y escuelas puede variar entre 0.35 y 8 (ASHRAE, 2021; Robertson, 2021). Sin embargo, las recomendaciones post-pandemia para minimizar exposición al virus COVID-19 es que el ACH sea entre 6 y 12 (ASHRAE, 2021; Robertson, 2021). En este sentido, se considera que los sistemas pasivos implementados deben permitir el intercambio total de aire de la vivienda por lo menos seis veces en el transcurso de una hora. Para estimar el ACH considerando volumen de aire y velocidad del viento se utilizaron ecuaciones de la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2009) y datos de la investigación de (Liu & Lee, 2020).

(Eq. 5) Cambio de Aire por Hora (World Health Organization, 2009): $ACH = \frac{V_v \cdot A \cdot 3600}{Vol}$

Donde:

ACH = Número de Cambios de Aire por Hora

V_v = Velocidad del viento (m/s)
 A = Área abierta más pequeña en un cuarto con dos aperturas opuestas (m²)
 Vol = Volumen del cuarto (m³)

(Eq. 6) Tasa de ventilación (World Health Organization, 2009):

$$Vent = 0.65 \cdot V_v \cdot A \cdot 1000$$

Donde:

$Vent$ = Tasa de ventilación (l/s)
 V_v = Velocidad del viento (m/s)
 A = Área abierta más pequeña en un cuarto con dos aperturas opuestas (m²)

b. Línea de base energética, económica y de carbono

La línea de base total en términos energéticos (kWh), de carbono (kg CO₂e) y económicos (BOB), fue estimada considerando: 1) una lista básica de equipos eléctricos, su potencia (W) y el tiempo de uso diario (h); 2) el factor de emisión de 0.43 kg CO₂e/kWh para Bolivia (Fernández-Vásquez & Fernández-Fuentes, 2018); y 3) el Costo de la Energía Nivelado (LCOE en inglés) de 0.91 BOB/kWh para la ciudad de Santa Cruz. Es a partir de esta línea de base que se estimaron reducciones.

c. Premisas de diseño para maximizar renovación del aire interior y minimizar costos económicos y ambientales

Tomando en cuenta la jerarquía de diseño baja en carbono (Kamal, 2012b; Yin et al., 2013) se realizó una revisión de sistemas de ventilación y enfriamiento pasivo compatibles con el clima tropical y con el modelo de vivienda social. Se analizaron trabajos internacionales como el de Suasnavas Ceallos et al. (2021), investigaciones específicas para viviendas sociales bioclimáticas en Santa Cruz (Hurtado, 2011) y recomendaciones a partir de datos climáticos (2003 – 2017) para la simulación de rendimientos de edificios para la ciudad de Santa Cruz en el formato EPW (*EnergyPlus Weather Format*) (Climate One Building, 2017) por el software Climate Consultant 6.0 (University of California, 2018).

III. RESULTADOS

Se utilizaron los siguientes parámetros con respecto a la vivienda social para las estimaciones correspondientes:

| | |
|---|----------------------------|
| Orientación de la fachada principal: | Oeste |
| Superficie de la vivienda: | 79.58 m ² |
| Altura de los ambientes interiores: | 2.8 m |
| Volumen de aire interno de la vivienda: | 223 m ³ |
| Número de ocupantes: | 4 |
| Densidad ocupacional: | 20 m ² /persona |

a. Energía para Enfriamiento e Índice de Cambio de Aire por Hora (ACH)

Se calculó que las cargas térmicas provenientes del ambiente exterior de la vivienda suman 4983 W y las que proveen del interior 5423 W, haciendo un total de carga térmica de 10406 W que tienen que ser enfriados por un sistema de aire acondicionado de aproximadamente 35506 BTU/h. Las opciones comerciales disponibles en el mercado sistemas de aire acondicionado tipo Split hasta de 36000 BTU/h con potencias de funcionamiento de 1865 W tienen costos aproximados de 6900 BOB. Sin embargo, analizando los planos de la vivienda, podría instalarse un sistema de aire acondicionado de 18000 BTU/h en la sala principal y dos sistemas de 9000 BTU/h, uno en cada dormitorio. Se estimó un uso promedio de dos horas por día en los meses donde la temperatura en el exterior es superior al confort térmico que son los meses de Enero a Abril y de Julio a

Diciembre según datos climáticos históricos para Santa Cruz (Climate One Building, 2017; University of California, 2018).

Respecto al número de Cambios de Aire por Hora para la vivienda, luego de analizar su arquitectura, se llegó a la conclusión que por su diseño la ventilación cruzada es nula o mínima.

b. Línea de base energética, económica y de carbono

La estimación total del costo de operación de la vivienda, incluyendo el uso de aire acondicionado (sin considerar el costo de inversión), puede resultar en: 1) Uso energético de 466 kWh/mes, 2) Emisiones de gases de efecto invernadero de 200 kg CO₂e/mes o el equivalente a quemar 87 litros de gasolina por mes, y 3) un costo mensual aproximado de 423 BOB.

c. Premisas de diseño para maximizar renovación del aire interior y minimizar costos económicos y ambientales

Por un lado, para que ocurra el cambio mínimo de aire recomendado en tiempos de pandemia (ACH = 6) en la vivienda social, se necesita una tasa de ventilación de 371 litros de aire por segundo o su equivalente a 1337 metros cúbicos de aire por hora.

Por otro lado, con el promedio anual de la velocidad del viento en Santa Cruz de 3.8 m/s y considerando ventilación cruzada con una apertura mínima de salida de 0.9 m², que es la dimensión de abertura de las ventanas de las viviendas, se puede llegar a obtener 36 cambios de aire por hora, o su equivalente a 2223 litros de aire por segundo. Seis veces más de lo recomendado.

Estos resultados sugieren que: 1) implementando un sistema de ventilación cruzada en cada ambiente de la vivienda social, se aumentaría en 36 las veces de cambio de aire por hora, y 2) al maximizar el uso de sistemas pasivos para ventilación y enfriamiento, simultáneamente se reduciría el costo energético, económico y ambiental hasta en un 70% según la jerarquía de diseño energético de Kamal (2012^a); Yin et al. (2013) y las recomendaciones de modelador *Climate Consultant* con los datos climáticos para Santa Cruz (University of California, 2018).

En este sentido, las premisas de diseño bajas en carbono para las viviendas sociales en Santa Cruz pueden incluir:

| Premisas de diseño | Descripción |
|---|--|
| Orientación apropiada para minimizar ganancia de calor y maximizar viento predominante. | <p>Minimizar la exposición de acristalamientos en dirección este-oeste, donde se registra la máxima ganancia de calor solar y a las altas temperaturas de la tarde durante los meses cálidos.</p> <p>Maximizar la ventilación cruzada considerando vientos predominantes del noroeste al sureste para la ciudad de Santa Cruz.</p> |
| Uso de materiales térmicos livianos. | El adobe, por ejemplo, tiene una conductividad térmica baja de 0.176 W/m °C (Holguino Huarza et al., 2018) en comparación con el ladrillo macizo (0.72 – 0.90 W/m °C) o el hormigón (1.63 – 2.74 W/m °C). |
| Implementación de sistemas de ventilación natural. | <p>Sistemas compatibles con la vivienda social:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Muros trombe. - Torres de viento. - Ventilación vertical (efecto chimenea), producido por aperturas en la parte inferior y superior de la vivienda |

| | |
|--|---|
| | <p>pueden resultar en una diferencia de por lo menos 1.7 °C entre el interior y el exterior. La diferencia de alturas entre ambas aperturas debe ser mínimamente de tres metros para viviendas residenciales mientras mayor la diferencia de altura mayor el flujo e intercambio de aire (Architecture 2030, n.d.; University of California, 2018).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ventilación cruzada entre ventanas y puertas. - Pozos canadienses. |
| <p>Techos altos y ventanas altas operables (francesas) protegidas por aleros, voladizos profundos y verandas para minimizar la exposición térmica solar.</p> | <p>Fachadas y ventanas al Oeste reciben 705 horas de exposición solar mayor al confort térmico y 560 horas de sombra en el periodo verano – otoño. Durante el periodo invierno-primavera, reciben 684 horas de exposición solar mayor al confort térmico y 584 horas de sombra. Aleros, voladizos y verandas que forman un ángulo entre la vertical y la horizontal de la distancia del alero pueden reducir las horas de exposición solar de la siguiente manera:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ángulo de 70°, reducción del 21% de horas de exposición solar por encima de la temperatura de confort térmico. - Ángulo de 60°, reducción del 29% de horas de exposición solar. - Ángulo de 50°, reducción del 40% de horas de exposición solar. - Ángulo de 40°, reducción del 55% de horas de exposición solar. |
| <p>Uso de sistemas de ventilación en el techo.</p> | <p>El uso de ventiladores centrales de techo pueden ayudar a rebajar la sensación térmica por lo menos en cinco grados centígrados (5 °C) (University of California, 2018). Además, que su demanda energética es baja (40 – 70 W) comparada con la de los sistemas de aire acondicionado Split (1865 W) y que también ayudará al intercambio de aire con el exterior.</p> |
| <p>Uso de árboles y vegetación (preferentemente nativa) para minimizar ganancia térmica al oeste, este, noreste y noroeste.</p> | <p>Fachadas y muros bajo sombra de árboles pueden estar entre 11 y 25 °C más frías que las superficies sin sombras (Architecture 2030, n.d.; University of California, 2018). Temperaturas bajo las copas de los árboles pueden ser reducidas entre 1 y 5 °C comparadas con terrenos abiertos, y entre 11 y 17 °C comparados con lotes de parqueo (Architecture 2030, n.d.; University of California, 2018).</p> |

IV. CONCLUSIONES

Se puede concluir que: a) el diseño de la vivienda social no permite ventilación cruzada para la renovación del aire con el exterior y además necesita 10 405.85 W de energía para mantener su interior dentro la temperatura de confort térmico, b) con una velocidad mínima de 3 m/s en la ciudad de Santa Cruz y una configuración de diseño para facilitar la ventilación cruzada en la vivienda social, se puede conseguir por lo menos cuatro veces más el número de cambio de aire por hora recomendado (ACH = 3) por ASHRAE para tiempos de pandemia, c) si se maximiza la implementación de sistemas pasivos en la vivienda social, se reducirá la necesidad de uso de aire acondicionado hasta en un 70% manteniendo un confort térmico y minimizando el riesgo de exposición al virus del COVID, d) también se puede minimizar los costos económicos hasta casi 20% de ahorro en la fase de operación, e) minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (hasta 953 kWh/año o su equivalente de 410 kg CO₂e/año), y f) recuperar sistemas constructivos locales como conservación del patrimonio cultural del oriente del país compatibles con las premisas de diseño bajo en carbono e incorporar sistemas pasivos efectivos implementados en otras partes del mundo.

BIBLIOGRAFÍA

- Architecture 2030. (n.d.). *2030 Palette – A database of sustainable design strategies and resources*. Retrieved January 4, 2022, from <http://2030palette.org/>
- ASHRAE. (2021). *ASHRAE Epidemic Task Force: Healthcare*. <https://www.ashrae.org/file-library/technical-resources/covid-19/ashrae-healthcare-c19-guidance.pdf>
- Climate One Building. (2017). *Repository of Free Climate Data for Building Performance Simulation: WMO Region 3 - South America*. <https://Climate.Onebuilding.Org/>.
<https://climate.onebuilding.org/default.html>
- El Deber. (2020, March 10). *Por ola de calor sube un 30% el consumo de energía eléctrica en Santa Cruz | EL DEBER*. https://eldeber.com.bo/santa-cruz/por-ola-de-calor-sube-un-30-el-consumo-de-energia-electrica-en-santa-cruz_169006#.XmgrB7V5oHI.facebook
- EPA. (2021). *Indoor Air and Coronavirus (COVID-19)*. Environmental Protection Agency US. <https://www.epa.gov/coronavirus/indoor-air-and-coronavirus-covid-19>
- Fernández-Vásquez, C., & Fernández-Fuentes, M. (2018). Inventario, evaluación y proyección de las emisiones de carbono provenientes del sector eléctrico nacional. *Bolivia 2025. Acta Nova*, 8(3), 483–495.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892016000200007
- Holguino Huarza, A., Olivera Marocho, L., & Escobar Copa, K. U. (2018). Confort térmico en una habitación de adobe con sistema de almacenamiento de calor en los andes del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 289–300.
<https://doi.org/10.18271/RIA.2018.394>
- Hurtado, C. (2011). *Vivienda Social Bioclimatica para Santa Cruz de la Sierra Bolivia*.
- INE. (2021). *Instituto Nacional de Estadística - INE*.
- Kamal, M. A. (2012a). An overview of passive cooling techniques in buildings: Design concepts and architectural interventions. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 55, 84–97.
- Kamal, M. A. (2012b). An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions. In *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* (Vol. 55, Issue 1).
[https://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2012\(1\)_8.pdf](https://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2012(1)_8.pdf)
- La Roche, P. (2010). Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en edificios: Análisis del funcionamiento de varias herramientas en diferentes climas. *Informes de La Construcción*, 62(517), 61–80. <https://doi.org/10.3989/ic.09.026>
- Liu, T., & Lee, W. L. (2020). Evaluating the influence of transom window designs on natural ventilation in high-rise residential buildings in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 62. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102406>
- Ministerio de Obras Públicas, S. y V. (MOPSV). (2020). *Manual de Construcción de Viviendas Sociales*.
- Rhode Island Department of Health. (2021, November 23). *Preventing the Spread of COVID-19 By Circulating Air in Schools and Other Buildings |*. RI COVID-19 Information Portal. <https://covid.ri.gov/covid-19-prevention/indoor-air-circulation>

- Robertson, P. (2021, August 24). *ASHRAE Recommended Air Changes Per Hour – Smart Air*. Smart Air Filters. <https://smartairfilters.com/en/blog/ashrae-air-changes-per-hour-office-residential/>
- Sant'Ana, G., Imoto, A. M., Amorim, F. F., Taminato, M., Peccin, M. S., Santana, L. A., Göttems, L. B. D., & Camargo, E. B. (2020). Infection and death in healthcare workers due to COVID-19: a systematic review | Infección y muerte de profesionales de la salud por COVID-19: revisión sistemática | Infecção e óbitos de profissionais da saúde por COVID-19: revisão sistemática. *ACTA Paulista de Enfermagem*, 33. <https://doi.org/10.37689/ACTA-APE/2020AO0107>
- Servicios Ambientales S. A. (2017). *Serie Huella de Ciudades No. 12 Ciudad de Santa Cruz de la Sierra* (CAF (ed.)). [https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1663/Huellas de Ciudades-Ciudad de Santa Cruz de la Sierra.pdf?sequence=51&isAllowed=y](https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1663/Huellas%20de%20Ciudades-Ciudad%20de%20Santa%20Cruz%20de%20la%20Sierra.pdf?sequence=51&isAllowed=y)
- Suasnavas Ceallos, M. E., Iza Aigaje, R. P., & Quel Espinoza, E. R. (2021). *Conjunto de viviendas sostenibles mediante una arquitectura bioclimática en Conocoto* [Quito: UCE]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/23344>
- Toledo, Y. (2019, November 20). *Santa Cruz bate el récord histórico de consumo eléctrico* | EnergyPress. Energy Press. <https://www.energypress.com.bo/2019/11/20/santa-cruz-bate-el-record-historico-de-consumo-electrico/>
- University of California. (2018). *Climate Consultant* (6.0). University of California.
- World Health Organization. (2009). *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings* (J. Atkinson, Y. Chartier, C. Lúcia Pessoa-Silva, P. Jensen, Y. Li, & H. Seto (eds.); WHO). https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/natural_ventilation.pdf
- Yin, L., Jiangong, Y., & Hong, Y. (2013). The passive design strategy of ecological residence adapted to Nanjing area. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(sup1), s103–s110. <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.834588>