



EVALUACION DE DESEMPEÑO AMBIENTAL DE CONSTRUCCIONES CON TIERRA MEDIANTE SIMULACIONES CALIBRADAS

Juan Carlos Patrone¹, John Martin Evans², Ariel González³, Germán José Musante⁴

¹⁻² Centro de Investigación Hábitat y Energía, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires.

Ciudad Universitaria Pabellón 3, piso 4, CABA, Argentina, tel. (+ 54 11) 4789-6274

¹ arqpa@yahoo.es; ² evansjmartin@gmail.com

³⁻⁴ Departamento de Ingeniería Civil, Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional.

Lavaise 610, Santa Fe, tel. (+ 54 342) 4696029

dtocivil@frsf.utn.edu.ar; ³ aagonzal@frsf.utn.edu.ar

Palabras claves: Confort. Eficiencia energética. Impacto ambiental. Sustentabilidad

Resumen

El objetivo de este trabajo es obtener una base metodológica para ser utilizada como herramienta válida en futuras investigaciones que permitan mejorar la eficiencia energética de las construcciones de tierra dentro de los estándares de confort normalizados. Este trabajo presenta la primera fase exploratoria, realizada durante el año 2012, con el aporte de una serie de mediciones de temperatura y humedad registradas en tres viviendas construidas con diferentes técnicas empleando tierra cruda, ubicadas en los alrededores de la Ciudad de Santa Fé, con el fin de analizar, verificar, evaluar y comparar las situaciones de confort en el interior de las mismas. Dos de los casos en estudio corresponden a ampliaciones adosadas a construcciones convencionales existentes, lo cual permite la comparación de las distintas tecnologías. Por otra parte, en dos de dichas viviendas se utilizaron adobes y techo verde, mientras que en otra se utilizó BTC, bloques de tierra comprimida, y techo de paja. Esta diversidad ha permitido realizar un primer análisis comparativo entre construcción con tierra y construcción convencional, como también entre las distintas técnicas de tierra. Se trabajó luego con el programa Design Builder realizando las simulaciones correspondientes a cada una de las viviendas, para luego confrontarlas con los resultados de las mediciones y realizar el trabajo de ajuste sucesivo a través de simulaciones calibradas. Este procedimiento permitió integrar algunos parámetros para realizar la simulación, como así también verificar los datos recogidos de la auditoría térmica. Los resultados permiten establecer el comportamiento de la construcción con tierra en forma comparativa con la construcción convencional a través de mediciones in-situ y simulaciones numéricas, aportando evidencia del desempeño ambiental del suelo como material de construcción y soporte al valor tecnológico, estético y patrimonial del mismo en el marco de la Construcción Sustentable. Se cuenta con mediciones de invierno y verano, y los resultados obtenidos serán la base para las hipótesis de futuros trabajos, ahondando tanto en los estudios comparativos de confort bioambiental con distintas tecnologías constructivas como en la metodología de análisis y registro de datos.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace 10 años la UTN – FRFSF incorpora dentro de sus líneas de investigación la construcción con tierra cruda. Se han desarrollado y desarrollan:

- Estudios de las prestaciones de elementos constructivos realizados con técnicas tradicionales de tierra.
- Proyectos interlaboratoriales con el fin de homogenizar métodos de ensayos y formas de certificar calidades de productos a base de tierra cruda.
- Incorporación de nuevos materiales y tecnologías a las usualmente reconocidas maneras de trabajar la tierra en construcción (Adobes, tapia, BTC, técnicas mixtas)
- Rescate y desarrollo de técnicas innovadoras para el mejoramiento de las prestaciones constructivas (Tierra vertida).

- Adecuación y desarrollo de prensas para la ejecución de bloques de tierra comprimida (BTC)
- Servicios a terceros de análisis de suelos, verificación de aptitudes para diversas técnicas y propuestas de dosificación.
- Ensayos de Resistencias a esfuerzos mecánicos y durabilidad.
- Desarrollos de investigaciones y adecuaciones constructivas para casos especiales.
- Transferencia e intercambio de conocimientos en tecnologías de tierra cruda con énfasis en BTC.
- Capacitación a pobladores y microemprendedores en técnicas de construcción con tierra.

En el desarrollo de estas actividades se generaron vínculos institucionales, entre otros, el contacto con el CIHE, Centro de Investigaciones Hábitat y Energía de la Universidad de Buenos Aires. Con esta institución reflexionamos acerca del escaso material existente en nuestro medio referido al análisis del confort bioambiental; de ello surgió el proyecto de realizar mediciones de temperatura y humedad en viviendas construidas con tierra cruda y en las cuales la UTN Santa Fe tiene participación en el asesoramiento y vínculo con los propietarios.

Es así que se firma el correspondiente acta acuerdo entre ambas instituciones para realizar conjuntamente la medición y análisis de los datos de diversas viviendas en Santa Fe y alrededores que se está llevando a cabo en la actualidad.

Aportando al concepto de sustentabilidad desde una de las etapas en la vida de la edificación que tiene que ver con la disminución del uso de recursos no renovables y valorando una calidad y salubridad del ambiente en contacto con el hombre; planteamos como objetivo cuantificar las mejoras higrotérmicas que suceden en el interior de viviendas construidas con técnicas de tierra cruda; considerando a priori que la tierra posee excelentes cualidades tanto en su coeficiente de transmitancia térmica como en su capacidad para regular la humedad ambiente.

2. DESARROLLO DE LA TOMA DE DATOS

2.1. Descripción de las viviendas

Primeramente se seleccionaron cuatro viviendas (solo una de ellas cuenta con mediciones de verano e invierno) que se encuentran en la zona, realizadas con tecnologías en tierra para obtener las mediciones. Se buscó que en lo posible estén realizadas con diferentes técnicas constructivas, para permitirnos un análisis comparativo entre ellas, así como en relación a otras construidas con tecnologías tradicionales.

Se llevaron a cabo mediciones en las diferentes viviendas, durante el mes de enero, en esta oportunidad, para obtener datos de verano. Una vez seleccionadas las viviendas, en cada una de ellas se ubicaron sensores de tipo data logger, procurando instalar al menos 3 por vivienda. La mayoría de los sensores sólo registran datos de temperatura, y algunos arrojan además los de humedades relativas, por lo que se procuró instalar al menos uno de estos últimos por vivienda.

También se instaló una estación meteorológica en la Facultad Regional Santa Fe, para obtener datos más precisos en lo que respecta a la temperatura exterior. Estos datos se tomaron como base para evaluar las condiciones térmicas en los interiores de las viviendas.

A continuación puede verse la ubicación de los sensores (figuras 1 a 3) de cada vivienda, así como imágenes de las mismas y una planilla síntesis de algunas de las características más relevantes.

Fecha de inicio de mediciones: 19/12 11:50 hs

Características de los elementos constructivos			
	piso	muro	cubierta
Adobe			
BTC			
Quincha			
Ladrillo común			
Paja			
Losa			
Chapa			
Vivo			
Sobre contrapiso			
Entablado s/cámara de aire			

Características de ocupación y uso		
Ocupantes		Ocupación hs/día
Mayores	Menores	aprox 8 hs (promedio enero)
2		
Ventilación hs/día		% aventanamiento
Aprox 1 hs (promedio enero) la vivienda permaneció deshabitada unos 10 días		14.95%



Figura 1. Vivienda 1 – Arroyo Leyes

Fecha de inicio de mediciones: 19/12 11:50 hs

Características de los elementos constructivos				Características de ocupación y uso		
	piso	muro	cubierta	Ocupantes		Ocupación hs/día
Adobe				Mayores	Menores	aprox 20 hs (promedio enero)
BTC						
Quincha				2	1	
Ladrillo común						
Paja						
Losa						
Chapa						
Vivo						
Sobre contrapiso						
Entablonado s/cámara de aire						
				Ventilación hs/día		% acristalamiento
				Aprox 6 hs ventilación nocturna (promedio enero)		16.27%

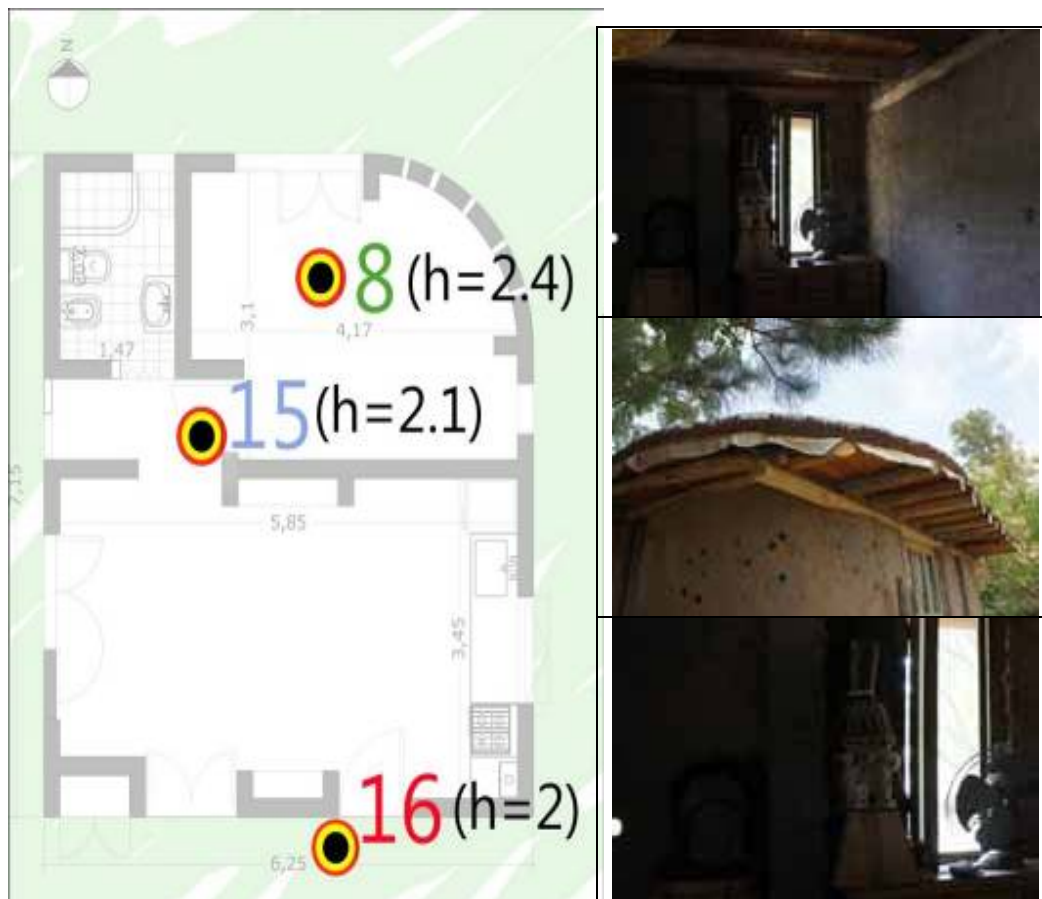


Figura 2: Vivienda 2 – Rincón Norte

Fecha de inicio de mediciones: 19/12 11:50 hs

Características de los elementos constructivos			
	piso	muro	cubierta
Adobe			
BTC			
Quincha			
Ladrillo común			
Paja			
Losa			
Chapa			
Vivo			
Sobre contrapiso			
Entablonado s/cámara de aire			

Características de ocupación y uso		
Ocupantes		Ocupación hs/día
Mayores	Menores	aprox 10 hs (promedio enero)
2		
Ventilación hs/día		% acristalamiento
aprox 2 hs (promedio enero)		6.83

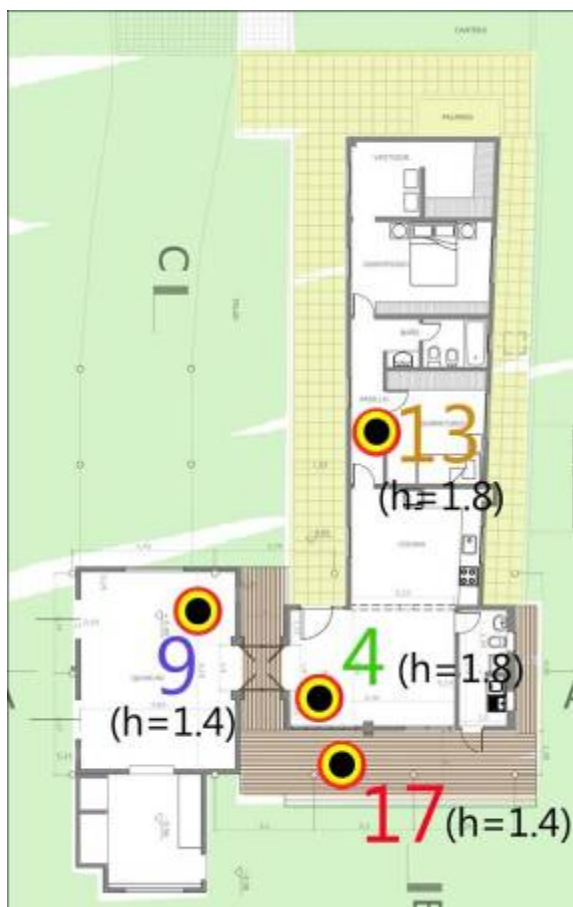


Figura 3: Vivienda 3 – Paraná

2.2. Análisis de datos térmicos

Luego de retirar todos los sensores se dispone de planillas en donde se encuentran las temperaturas correspondientes a cada período, tiempo de registro (15 minutos). Es por esto que se realiza primeramente un promedio entre las temperaturas y humedades registradas en una hora, para obtener los valores “horarios”.

A partir de los valores arrojados por la estación meteorológica, se intenta buscar cuales son los días que pueden considerarse “de condiciones climáticas típicas”, para poder utilizarlo como muestras significativas que permitan realizar un análisis a partir de estos. Luego, se realiza un análisis de las amplitudes térmicas diarias. Así se encontró que, si bien estas se ubican en un rango desde 15,5 grados el 28 de enero hasta 3 grados el 11 de este mes, el promedio de amplitudes térmicas resulta ser de 11 grados. Por lo tanto se toman los días en donde se ubica en valores entre 10 y 12 grados de amplitud térmica como días de condiciones típicas.

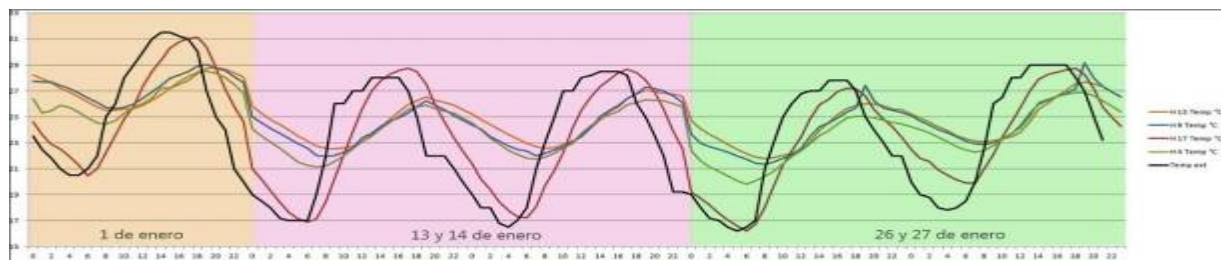
De esta manera surgen cinco días “típicos”. Estos son el 1, 13 y 14, 26 y 27 de enero, que se van a tomar para analizar los datos arrojados por los sensores. Se realizan los gráficos, en donde se puede comparar los resultados con la temperatura exterior medida con la estación meteorológica.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

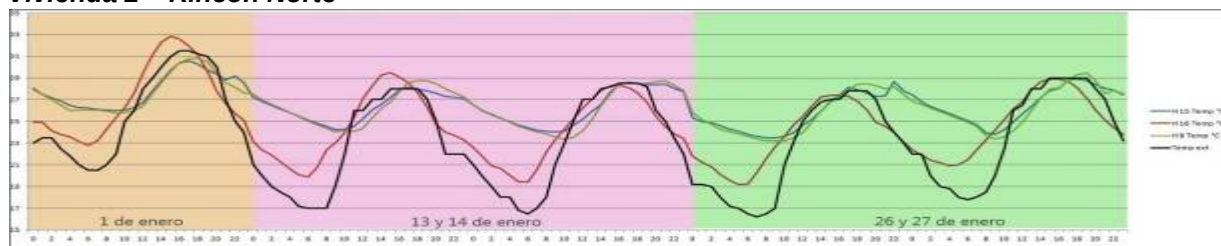
3.1. Análisis comparativo

En el gráfico 4 puede ver claramente el desempeño de cada una de las viviendas.

Vivienda 1 – Arroyo Leyes



Vivienda 2 – Rincón Norte



Vivienda 3 – Paraná

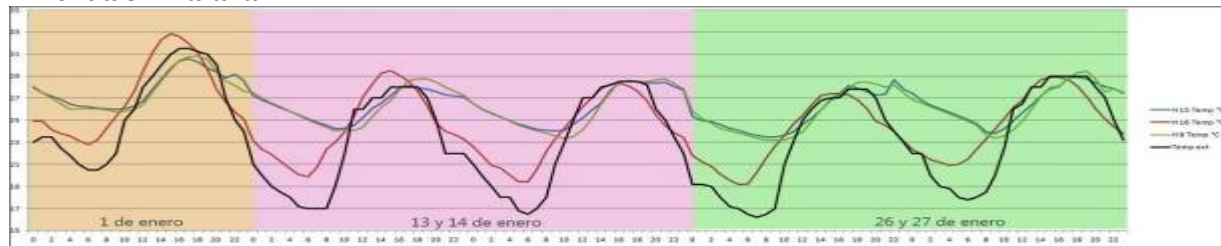


Figura 4: gráfico temperatura - tiempo

En el caso de la vivienda 1 a medida que aumenta la altura de la ubicación de los sensores, la temperatura registrada es mayor, habiendo un pequeño retraso entre la curva de la estación meteorológica y la de los sensores. El data logger situado al ras de la cubierta (nº

18) muestra cómo los registros de temperaturas más elevadas se conservan en el tiempo algo más que los otros.

En la vivienda 2, se observa cómo el sensor ubicado en el exterior se acerca más a la curva registrada por la estación meteorológica, si bien las temperaturas nocturnas resultan ser algo mayores en comparación con la vivienda 1.

Se observa cómo los registros en el interior de la vivienda, una vez alcanzado los límites máximos de temperaturas, tienen una caída muy lenta en el tiempo, es decir, una vez alcanzadas las temperaturas de mayor discomfort para verano, la vivienda tarda más tiempo en enfriarse.

En el caso de la vivienda 3, también se aprecia la curva del sensor ubicado al exterior, en este caso muy similar al registrado por la estación meteorológica.

Resulta muy interesante observar, que los límites máximos de temperaturas alcanzados en el interior de la vivienda se sitúan aproximadamente dos grados por debajo en comparación con los otros dos casos analizados.

En términos generales, se puede ver que en la vivienda 1 se alcanza un enfriamiento mayor, y en menor tiempo en comparación con las otras. Y la vivienda número 3 es la que alcanza temperaturas menores en los momentos más calurosos del día. En este caso, los cambios en la temperatura exterior tardan más tiempo en reflejarse en el interior, tanto en la etapa de calentamiento como en la etapa de enfriamiento de la vivienda.

En la vivienda número 2 el enfriamiento se produce más lentamente. Esto puede llegar a ser beneficioso para los meses invernales, pero resulta algo negativo para los meses de verano.

3.2. Análisis de datos de temperatura y humedad

Para realizar un análisis conjunto de los datos de temperatura y humedad, se utiliza un diagrama psicrométrico (figura 5).

En el mismo se ubica una zona que se considera, “de condiciones de confort”, que en el gráfico aparece en tono naranja. Los valores que se ubiquen dentro de ésta, se consideran que están dentro de los parámetros donde el ser humano lo percibe como confortables. Es decir, a medida que tengamos una mayor cantidad de puntos dentro de esta zona, las condiciones de habitabilidad en una determinada vivienda serán mejores.

A partir del diagrama psicrométrico y la delimitación de la zona de confort, se comienzan a introducir los diferentes datos. Para ello se tomó un promedio de los registros de los días “típicos” ya especificados, escogiendo sólo los datos arrojados por aquellos sensores que registraban ambas variables (temperatura y humedad relativa).

Estos son:

- La estación meteorológica
- Sensor nº 18 (Vivienda 1 - Arroyo Leyes)
- Sensor nº 16 (Vivienda 2 - Rincón Norte)
- Sensor nº 9 (Vivienda 3 - Paraná)

3.2.1. Estación Meteorológica

Si se observan los datos de la estación meteorológica se vera que sólo durante dos horas del día, las temperaturas se pueden considerar que estuvieron dentro de la zona de confort. Son los tres puntos que se encuentran dentro de la zona pintada de naranja, que son las registradas entre las 9 y las 11 horas de la noche del día 1 de enero de 2012, y entre la 1 y 2 horas de la mañana).

Esto significa que sólo durante algo más del 12 % de las horas del día permanecemos bajo temperaturas confortables.

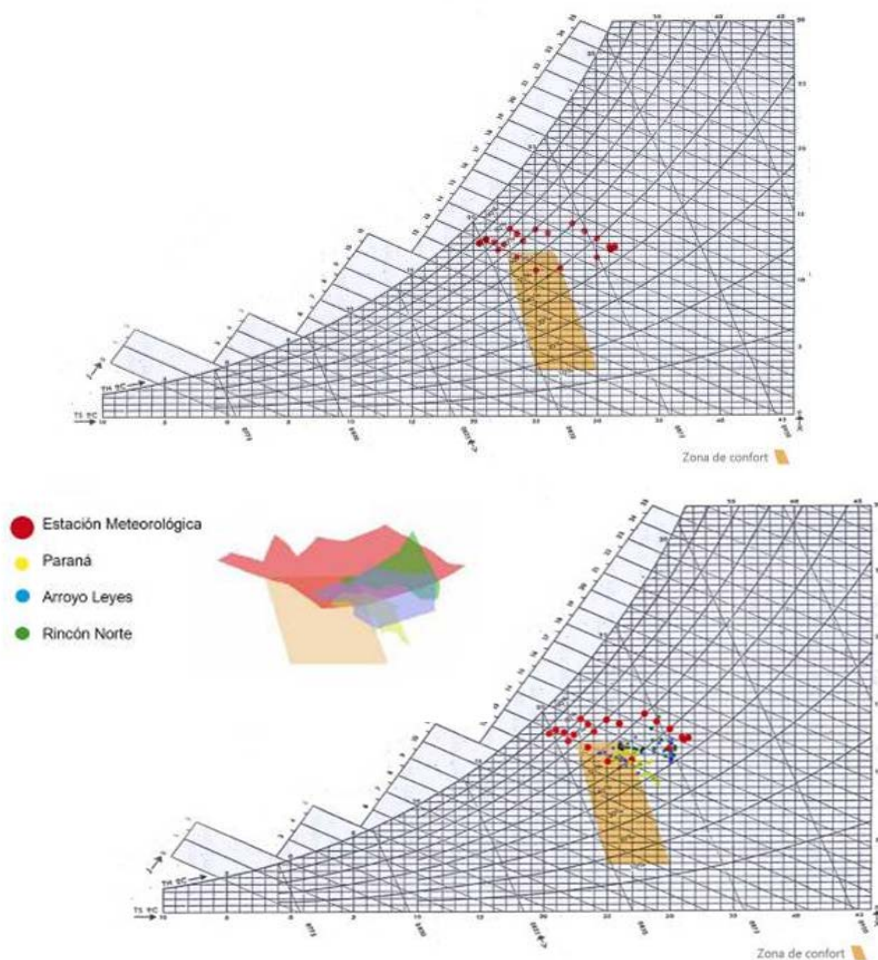


Figura 5: diagramas psicométricos

3.2.2. Data Logger Nro 18 (Vivienda 1 - Arroyo Leyes)

En el gráfico correspondiente al data logger nº 18 se ve que 11 puntos se encuentran dentro de la zona de confort, con su correspondiente porcentaje de algo más del 45% del día bajo temperaturas confortables. El porcentaje resulta muy favorable, si se considera que este sensor se encontraba a 10 cm de la cubierta, en donde se suele acumular la mayor cantidad de calor.

Las temperaturas “confortables” son consecutivas, y se registran mayormente en las horas nocturnas a partir de las 1 horas y hasta las 12 del mediodía.

3.2.3. Data Logger Nro 16 (Vivienda 2 - Rincón Norte)

Si se analizan los resultados para este mismo día en el interior de la vivienda que se grafica con los puntos verdes, se encontrara que 10 puntos se insertan dentro de la zona de confort. Estos coinciden con las temperaturas nocturnas, a partir de las 3 horas de la mañana y el confort se extiende hasta las 13 horas del mediodía. Puede observarse en el gráfico que los puntos que se encuentran fuera de la zona de confort no se alejan demasiado de la misma en comparación con la temperatura exterior, en donde se ven los puntos algo más expandidos en el gráfico.

Esto arroja un porcentaje algo menor que el 42%, para las horas del día en que se encuentra bajo temperaturas de confort en el interior de la vivienda.

3.2.4. Data Logger Nro 9 (Vivienda 3 - Paraná)

En el tercer caso, el sensor nº 9, también se acercan a la zona de confort unos 10 puntos, aunque se observa una notable reducción en las temperaturas alcanzadas en las diferentes horas del día en comparación con las mediciones anteriores.

En este caso las temperaturas ingresan a la zona de confort a partir de las 6 de la mañana, y se extiende hasta las 15 horas. En comparación con las anteriores, esto resulta favorable ya que en la zona más crítica, de calentamiento de la vivienda, cercana al mediodía, existe una mayor cobertura.

Se puede verificar gráficamente las diferentes nubes que se forman con los valores ubicados en el diagrama. Así se ve cómo se reduce la misma si se compara la estación meteorológica en relación a las diferentes resultantes interiores. Hay una menor amplitud térmica para una nube más pequeña, esto resulta una condición más favorable porque se aleja menos de la zona de confort.

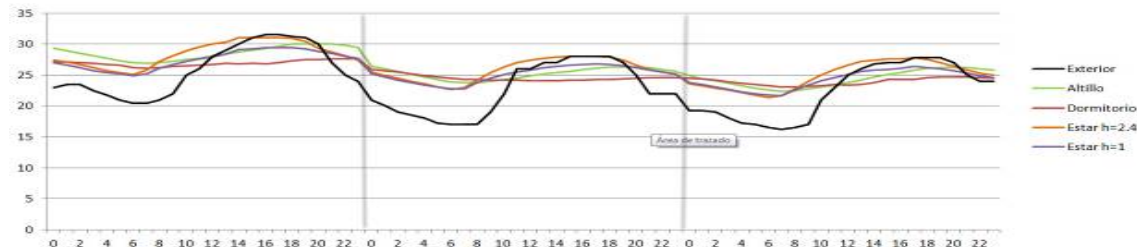
La nube amarilla es la más pequeña, a la vez, se acerca más a la parte inferior del gráfico en comparación con las otras, lo que indica que las temperaturas tienden a ser las más bajas de los tres casos analizados.

3.3. Análisis comparativo en vivienda con datos de invierno

En la figura 6 se muestran los datos comparativos registrados en verano y en invierno, en una vivienda ubicada en la ciudad de Rincón, en las cercanías a la ciudad de Santa Fe. La vivienda inicialmente fue construida con técnicas tradicionales y luego se realizó una ampliación con construcción en tierra. Esto permitió comparar los valores arrojados en los diferentes locales.

La zona del estar corresponde a la parte tradicional y el sector del dormitorio es el construido en tierra. Este local posee un entepiso/altillo en donde también se colocó un sensor. Se tomaron las mediciones registradas los días 1, 13 y el 26 de diciembre de 2011 para verano y para invierno las del 27 de agosto, el 13 y 16 de septiembre de 2012. Los datos logueros se ubicaron en los mismos lugares aunque en verano se dispuso de un sensor más que se ubicó en el estar, a una altura diferente.

Mediciones de verano



Mediciones de invierno

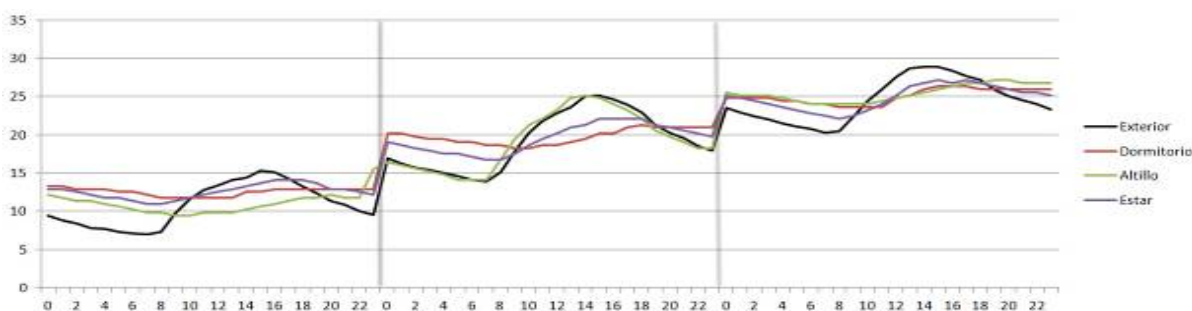


Figura 6 – gráfico de datos comparativos registrados en verano y en invierno

Se realizó un gráfico de barras (figura 7) con las medias de temperaturas, en este caso para cada día se divide en una fase de calentamiento y una de enfriamiento, que para simplificar los pasos se toma el período de 0 a 12 del mediodía y otro de éste a las 24 horas.

Para las medidas tomadas en verano, si bien en las primeras horas del día no parece haber mucha diferencia entre los distintos locales, pasadas las 12 horas, el dormitorio (construido en tierra) pareciera calentarse algo menos que el resto de los locales.

A simple vista podemos observar también que para las mediciones de invierno, y durante las horas de la mañana, el dormitorio es el que mayor conserva la temperatura, y donde está la mayor amplitud térmica en relación a la temperatura exterior.

Una vez pasado el mediodía, al aumentar la media de temperatura exterior, los otros locales parecen calentarse algo más rápido que el dormitorio como igualmente ocurre en verano. El altílo, para los meses de invierno parece responder de muy buena manera, ya que posiblemente la estratificación del calor lo favorece. Esto no se refleja en los meses de verano.

Se podría pensar a partir de los gráficos que la tierra posee buenas propiedades para almacenar temperatura aunque no responde muy rápidamente si las condiciones exteriores cambian.

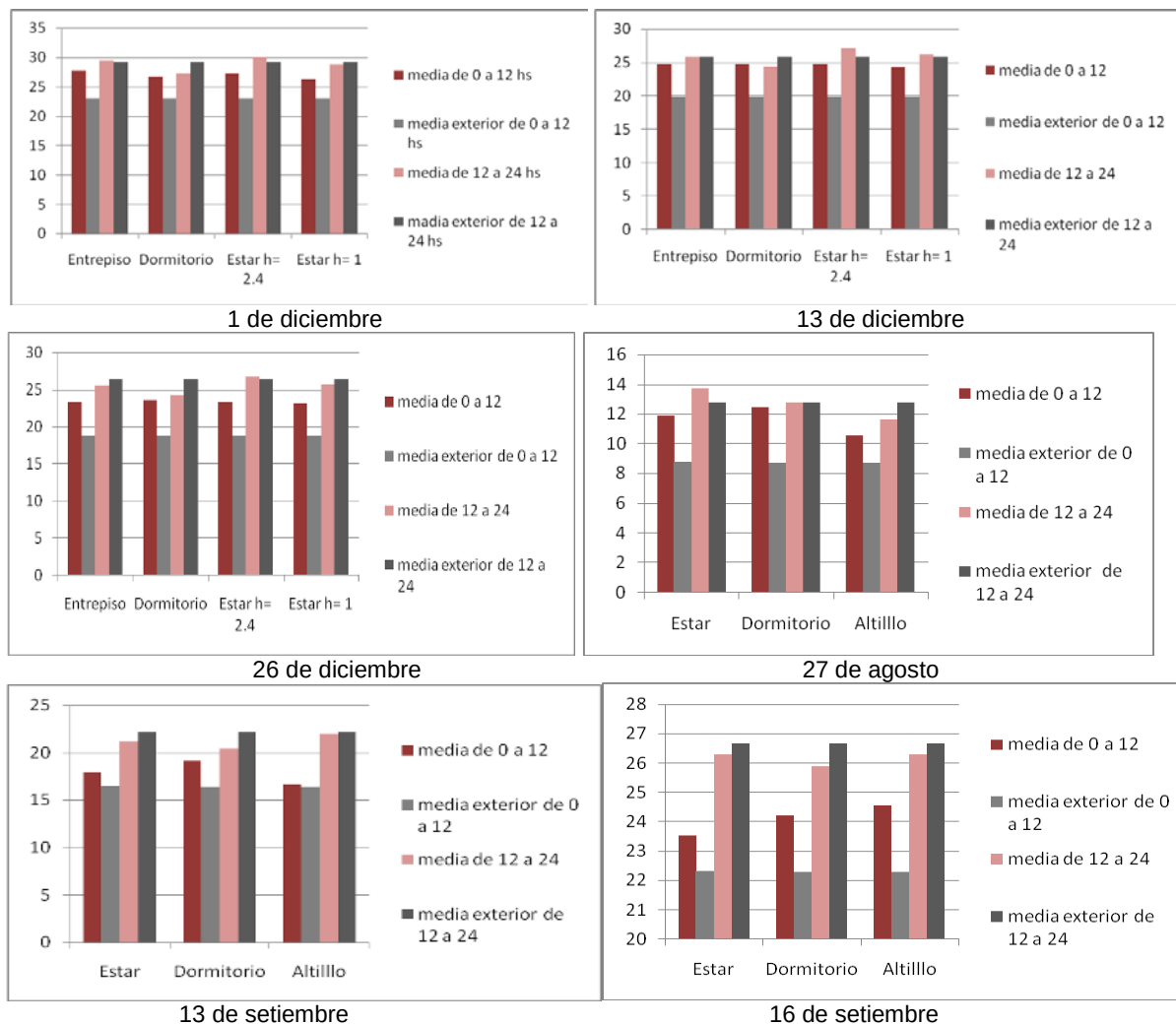


Figura 7. Gráficos de medias de temperatura

La capacidad de retener o aislar el calor por parte de un cerramiento es una de las características principales que requiere cualquier vivienda que se pretenda eficiente energéticamente. A raíz de este análisis la tierra parece responder de buena manera según los resultados de las mediciones realizadas.

3.4 Simulación

Otra herramienta que se utilizó como medio para obtener algunos valores cuantitativos que permitan establecer comparaciones entre tecnologías de tierra y tradicionales, fue la simulación por computadora, utilizándose programas diseñados al efecto.

Se tomó una de las viviendas en las que se realizaron mediciones, para realizar un primer análisis. En este caso la número 2, ubicada en Rincón Norte.

Cabe mencionar que en este software primeramente se ingresan los datos correspondientes al clima local, y luego se construye la vivienda virtualmente. A cada elemento constructivo se le asigna el material correspondiente, con sus respectivas propiedades térmicas (la transmitancia térmica de cada material resulta fundamental para el análisis).

Por otro lado se ingresa un calendario de actividades y personas que habitan la vivienda, para cuantificar las cargas internas emitidas por las personas y por los diferentes artefactos que producen calor como por ejemplo la cocina, la computadora o la iluminación; así como también las horas de ventilación, etc.

Una vez ingresados todos los datos, se realiza la simulación en la selección de días del año que se requieran.

De este modo se pueden observar que los resultados se presentan muy similares a los extraídos por las mediciones. Vemos que las temperaturas en el interior de la vivienda oscilan en casi todos los días, entre 24°C y 29°C.

La diferencia más notable en relación a las mediciones es que en el período de calentamiento de la vivienda, en la simulación se realiza en forma más extendida en el tiempo. Es decir, desde una primera aproximación, los resultados en la simulación son más optimistas que los extraídos de las mediciones.

4. CONCLUSIONES

De las mediciones realizadas con data loggers, desde una primera aproximación al análisis térmico, se puede decir que la vivienda número 3, es la que arrojó los resultados más favorables. Esta alcanza niveles de calentamiento inferiores al resto de las viviendas. También se observa que la curva de temperaturas interiores se encuentra más desplazada en el tiempo, aspecto que resulta positivo, ya sea que fuera ocasionado por la masa térmica que posea la vivienda o el nivel de aislamiento de la envolvente.

Un dato importante a tener en cuenta es que la vivienda tiene el menor porcentaje de aventanamiento en comparación con las otras, así como menor carga interna en relación a las personas que la habitan.

En la vivienda 1, el enfriamiento se produce más rápidamente en las horas en donde el sol comienza a esconderse, y se alcanzan las temperaturas más bajas de las tres viviendas, condición que resulta favorable para los meses de calor.

Cabe aclarar que estas dos primeras viviendas mencionadas, están construidas con BTC, y cubierta de paja.

En la vivienda número 2 el enfriamiento se produce más lentamente, y las temperaturas máximas alcanzadas resultan bastante elevadas, si bien no se diferencian demasiado de la vivienda 1. Se podría pensar que en los meses de invierno, las condiciones serán muy favorables, ya que la casa parece tener gran capacidad de conservación del calor. Sería de interés estudiar detalladamente para este caso, las cargas internas generadas por la cocina y sus respectivos usos.

Del análisis de datos de temperatura y humedad, se desprende que en la vivienda de Paraná los resultados resultan algo mejores, tanto por los niveles de temperatura y humedad alcanzados, que resultan menores que los otros casos; como por la reducida amplitud térmica alcanzada, en comparación con las otras viviendas.

En la vivienda de Arroyo Leyes, la amplitud térmica es la mayor, aunque los niveles alcanzados no son tan altos como en la vivienda ubicada en Rincón Norte.

En términos generales se ve que en las viviendas construidas con tierra, aproximadamente en un 45 a 50 % de las horas del día se encuentran temperaturas confortables.

De la simulación realizada en PC, si bien es una primera prueba del uso de esta herramienta, con el fin de extraer datos confiables de las características de los elementos constructivos de tierra; se pueden hacer algunas primeras lecturas al respecto.

Los resultados se presentan muy similares a los extraídos por las mediciones. Esto permite otorgar cierta confiabilidad en las evaluaciones que se puedan realizar por medio de este software, si bien vistos más en detalle, los resultados en la simulación son algo más optimistas que los extraídos de las mediciones.

Sería de interés, en futuros trabajos, modificar la materialidad de la vivienda en la simulación, para comparar los resultados entre distintos sistemas constructivos, desde las envolventes, a las cubiertas, etc.

Estos resultados permiten plantear futuros desarrollos que amplíen y profundicen los resultados obtenidos en pos de mejorar las hipótesis de trabajo en otros proyectos complementarios.

Currículos

Juan Carlos Patrone: Arquitecto FADU-UBA, investigador del Centro de Investigación Hábitat y Energía, en 2001 inició investigaciones en arquitectura y construcción con tierra, construyendo un prototipo experimental de vivienda económica en el Municipio de Florencio Varela, Gran Buenos Aires. Es miembro activo de la Red Iberoamericana PROTERRA y director del centro Terrabaires.

John Martin Evans: Dr. Arq. y Prof. Consulto UBA, Director del CIHE, es investigador en el uso racional, eficiencia energética y energías renovables en edificios. Graduado y docente en Architectural Association, Londres, Doctorado en Arquitectura en la Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos, fue Vice-Decano del Bouwcentrum International Education, Rotterdam, recibió premios, 'Pionero en energías renovables' de WREN, World Renewable Energy Network.

Ariel González: Ingeniero en Construcciones, Magister Scientiae en Metodología de la Investigación Científica y Técnica. Profesor e investigador de la UTN, Santa Fé, Argentina, trabaja en equipos interdisciplinarios en temas del hábitat urbano y rural. Secretario Ejecutivo de la Red Latinoamericana de Cátedras de Vivienda (ULACAV), miembro de la Red Ibero-americana PROTERRA y coordinador de la Red Argentina PROTIERRA.

Germán J. Musante: Arquitecto UNL, Master Oficial en Energías Renovables y Eficiencia Energética por la Universidad de Zaragoza. En 2010 integrante del Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza, realizando el prototipo de la vivienda a competir en el Solar Decathlon Europe 2012. Desde 2011/12 integra el Grupo de Investigación en Tierra Vertida, en el Departamento de Ingeniería Civil, UTN, Regional Santa Fé.