

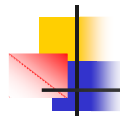
# ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE AIRE MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Leila Mora Iannelli

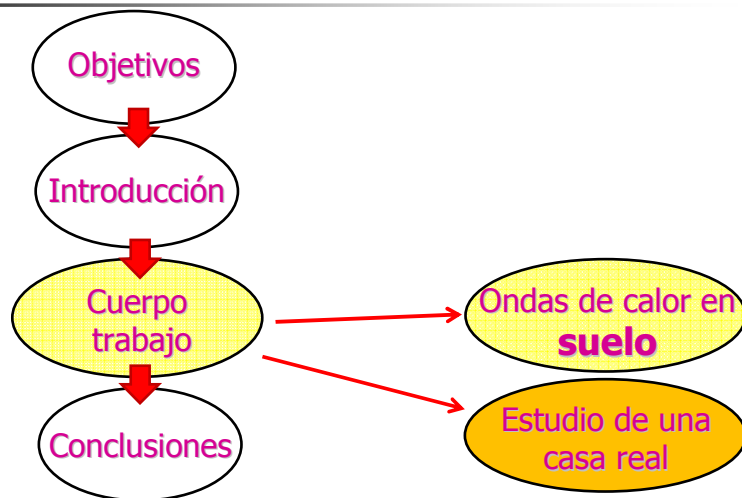
Salvador Gil

## HYFUSEN 2013

5to. Congreso Nacional - 4to. Congreso Iberoamericano  
HIDRÓGENO Y FUENTES SUSTENTABLES DE ENERGÍA  
Córdoba, Argentina, 10 - 14 de junio de 2013



## Esquema de la presentación

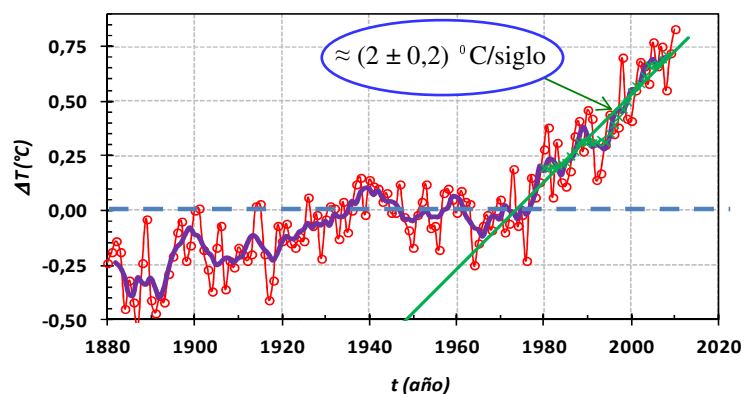


## Objetivos

- Estudios experimentales: **suelo**
- Modelo térmico del suelo Buenos Aires  $T(z, t)$
- Tubos enterrados
- Modelo de intercambio de calor suelo - aire
- Validación de modelo y aplicación a un caso real
- **Potencialidad energética – La Tierra como acondicionador natural de ambientes**

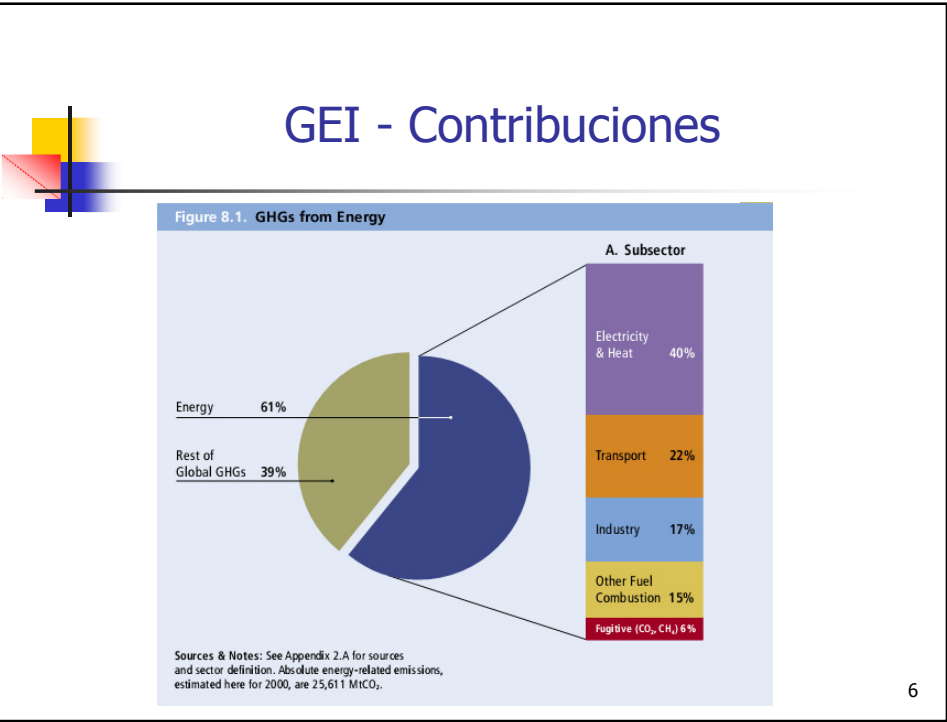
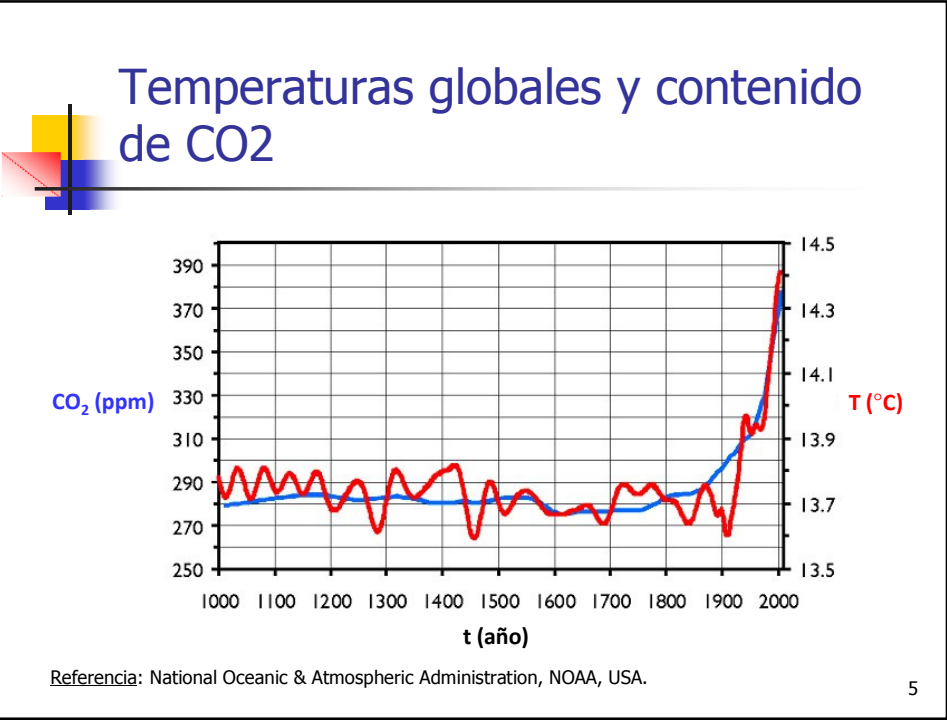
3

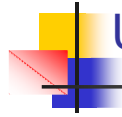
## Incremento de las temperaturas medias globales de la Tierra y los Océanos entre 1880-2010



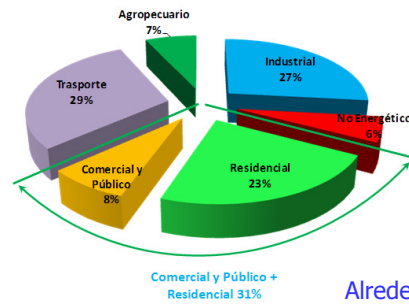
Referencia: NASA, Goddard Institute for Space Studies (GISS).

4





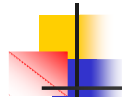
## Usos de la energía en Argentina



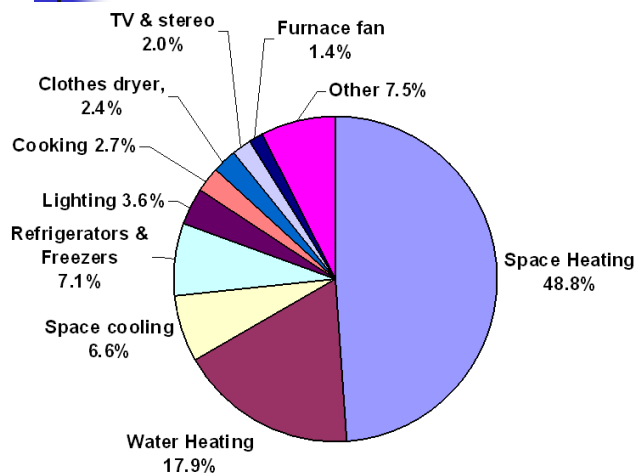
Alrededor del 58% de la energía de uso residencial, comercial y público o sea el 18% del total se usa en calefacción o aire acondicionado.

Referencia: Secretaria de Energía de la Nación (2010), <http://energia3.mecon.gov.ar>.

7



## Uso de la energía residencial en EE.UU. 2001

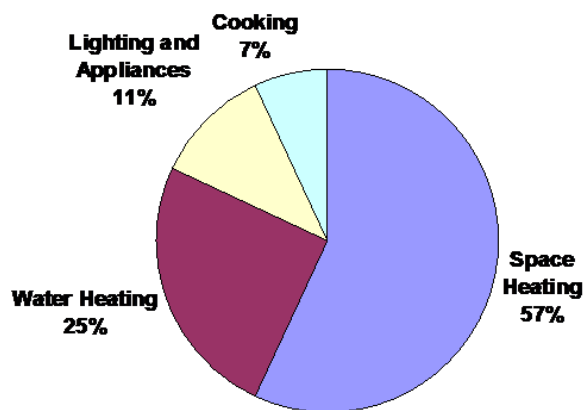
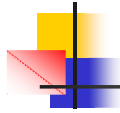


**En EE.UU.**

**Alrededor del 50% de la energía de uso residencial se usa en calefacción**

8

## Uso de la energía residencial en la EU 1998



En Europa

Alrededor del **57%** de la energía de uso residencial se usa en calefacción

9

## 1,5 millón de equipos de refrigeración vendidos, 2005 en Argentina

La Nación - Martes 20 de noviembre de 2007 |  
Cerca de **un millón de acondicionadores de aire** habrán sido vendidos en el país durante todo **2007**. Ello implica una **suba** de casi el **4%** en el **consumo eléctrico total**, según informó la Fundación para el Desarrollo Eléctrico (Fundelec) (...).

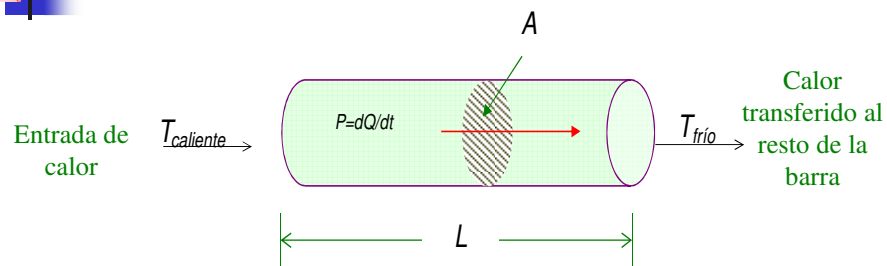
Referencia: Secretaría de Energía de la Nación, <http://energia3.mecon.gov.ar>.

## Cuerpo del trabajo

- ✓ Estudio teórico-experimental de **ondas de calor**
  - ✓ suelo
- ✓ Modelo de intercambio de calor suelo-aire en tubos enterrados
- ✓ Verificación con un *sistema real* de tubos enterrados

11

## Conducción - Ley de Fourier



$$P = \frac{dQ}{dt} = \text{Potencia transmitida}$$

$A$  = Área transversal al eje de la muestra

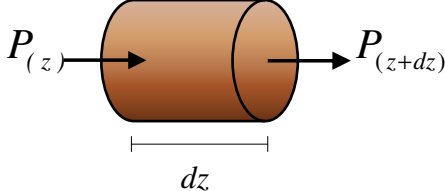
$K$  = Constante de conductividad

$\frac{dT}{dz}$  = Gradiente térmico (diferencia de temperatura/espesor)

$$P = \frac{dQ}{dt} = -K \cdot A \frac{dT}{dz}$$

12

### Ecuación de difusión del calor $T(z,t)$



$\delta Q = \delta m \cdot c \cdot dT$

$\frac{dQ}{dt} = -K \cdot A \frac{dT}{dz}$

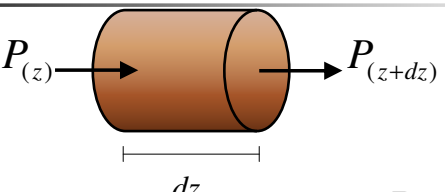
→

Difusividad  $k = K/\rho \cdot c$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

13

### Ley de Fourier – Ecuación del Calor



$$P_{(z)} = -KA \left( \frac{dT}{dz} \right)_z$$

$$P_{(z+dz)} = -KA \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z+dz}$$

$$-KA \left[ \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z+\Delta z} - \left( \frac{dT}{dz} \right)_z \right] = Adz \cdot c \cdot \rho \frac{dT}{dt}$$

$$\delta m = v\rho$$

$$\delta m = Adz \cdot \rho$$

$$\delta Q = \delta m \cdot c \cdot dT$$

$$P = \frac{dQ}{dt} = Adz \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

Difusividad  
 $k = K/\rho \cdot c$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

14

## Ondas de calor en 1D

$T(z,t)$  Barra aislada térmicamente

Si:  $T(z=0, t) = T_{00} + A_0 \cos\left(\frac{2\pi}{p_0} \cdot t + \phi_0\right)$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow T(z,t) = T_{00} + A_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu_0}\right) \cos\left(\frac{1}{\mu_0}(z \pm v_0 t + \phi_0)\right)$$

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{p_0 \cdot k}{\pi}}$$

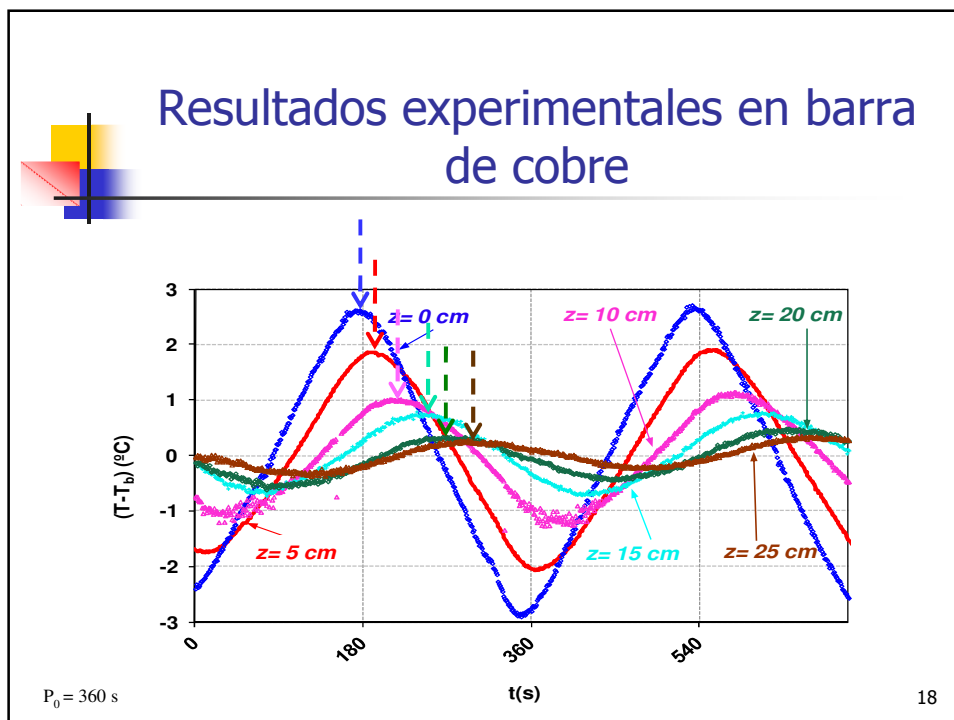
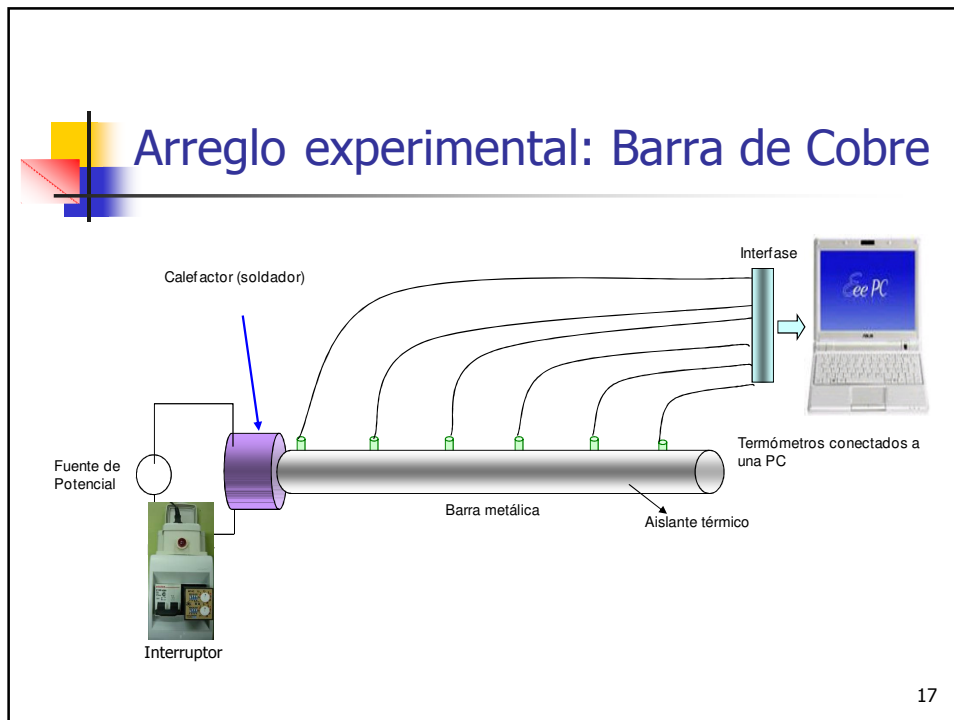
$$v_0 = \sqrt{\frac{4\pi \cdot k}{p_0}}$$

15

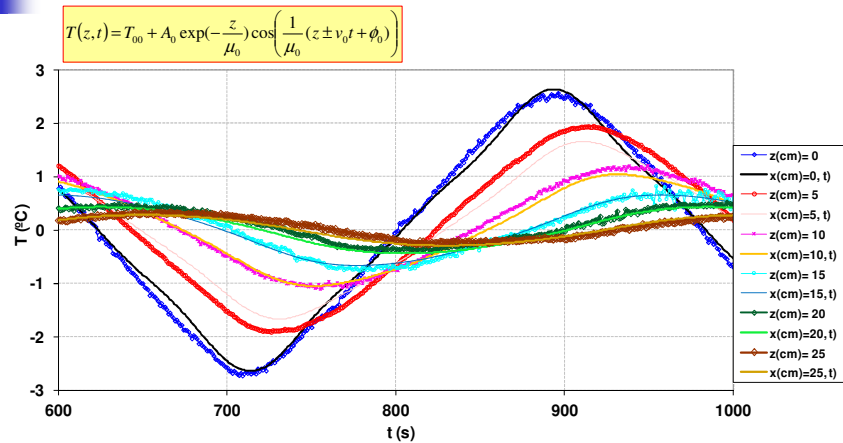
## Estudio de Ondas de Calor en una Barra de Cobre

16



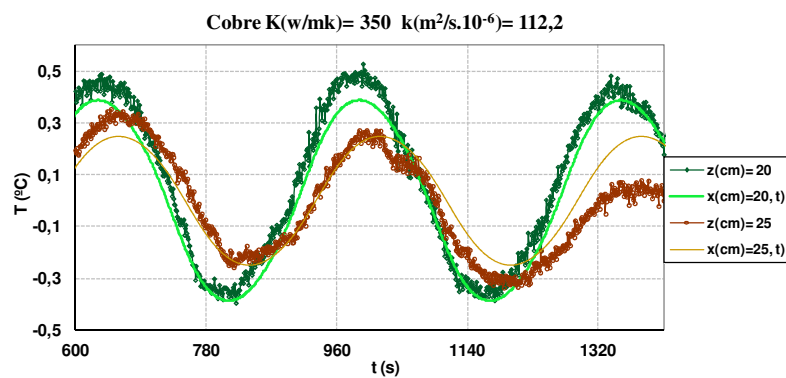


## Método Ajuste (datos medidos - expresión teórica)

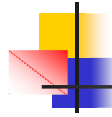


19

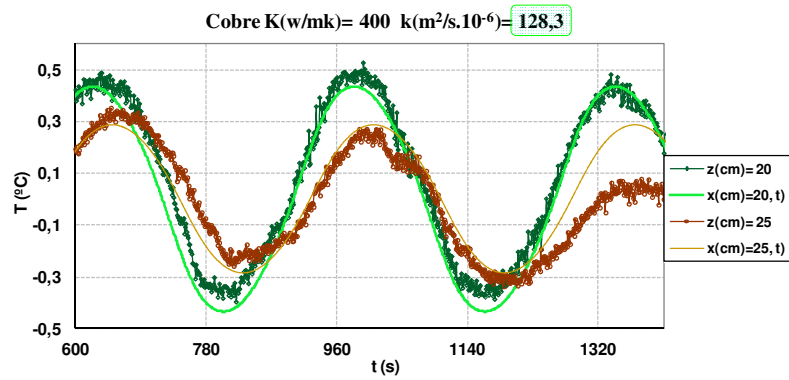
## Análisis del ajuste de datos al modelo



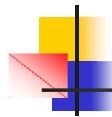
20



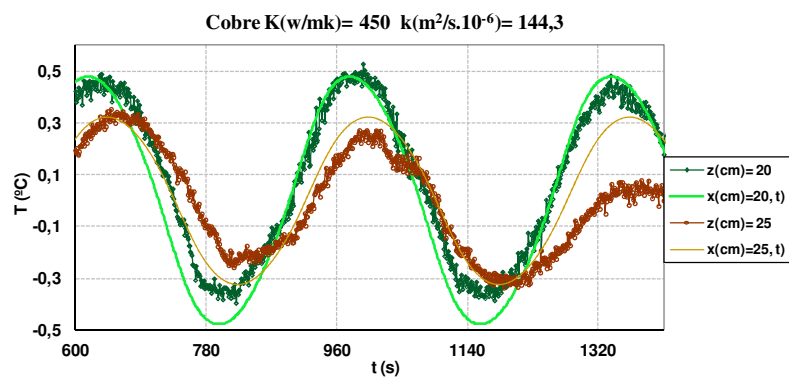
## Análisis del ajuste de datos al modelo



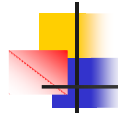
21



## Análisis del ajuste de datos al modelo

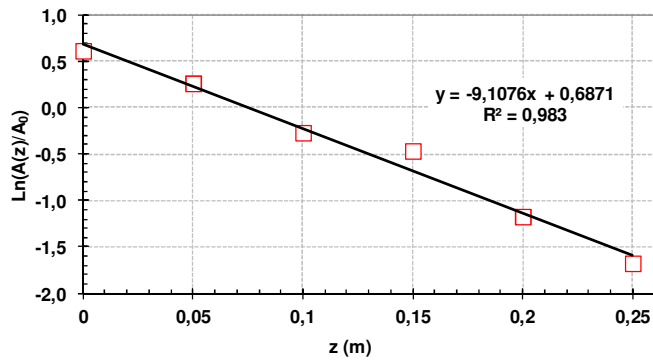


22



## Método de Atenuación

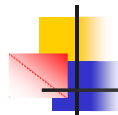
Análisis de la variación de amplitud de la señal con la profundidad



$$\text{pendiente} = -\frac{1}{\mu_0}$$

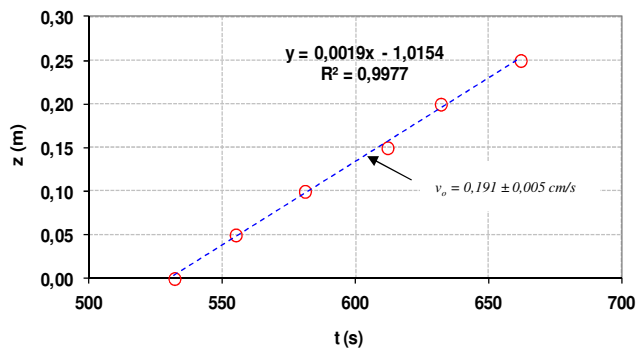
$$k = \frac{\pi \mu_o^2}{p_0}$$

23



## Método de Desfasaje

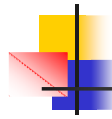
Análisis del desfase de la señal con la profundidad



$$\text{pendiente} = v_0$$

$$k = \frac{v_0^2 \cdot p_0}{4\pi}$$

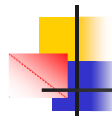
24



## Resultados obtenidos (Cu)

Coefficiente de difusividad térmica ( $k$ )	Experimental ( $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$ )	Tabulado Cu puro ( $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$ )
Método de Ajuste	$128 \pm 13$	113
Método de Atenuación	$105 \pm 2$	
Método de Desfasaje	$105 \pm 3$	
<b>Mejor valor de <math>k</math></b>	<b><math>106 \pm 2</math></b>	<b>113 (<math>\approx 107</math>)</b>

25



## Conclusiones Parciales

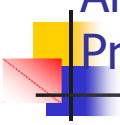
- ✚ El comportamiento cualitativo es bien descrito por el modelo (**atenuación y desfasaje**).
- ✚ Se observa que el modelo reproduce bien los datos medidos.
- ✚ Los  $k$  (**difusividad**) obtenidos con los tres métodos son consistentes con el valor tabulado.

26

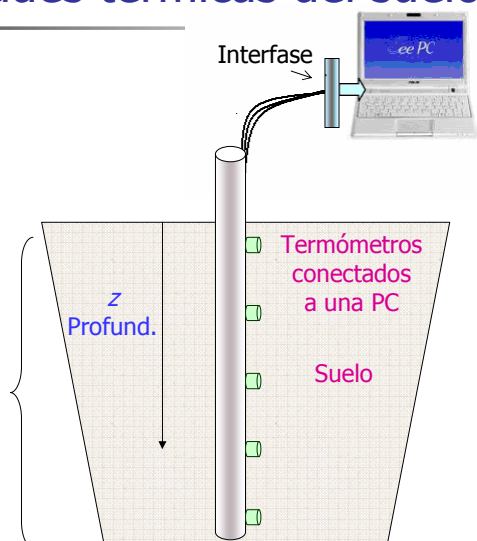



## Estudio de Ondas de Calor en el Suelo

27



### Arreglo experimental: Propiedades térmicas del suelo (Bs. As.)



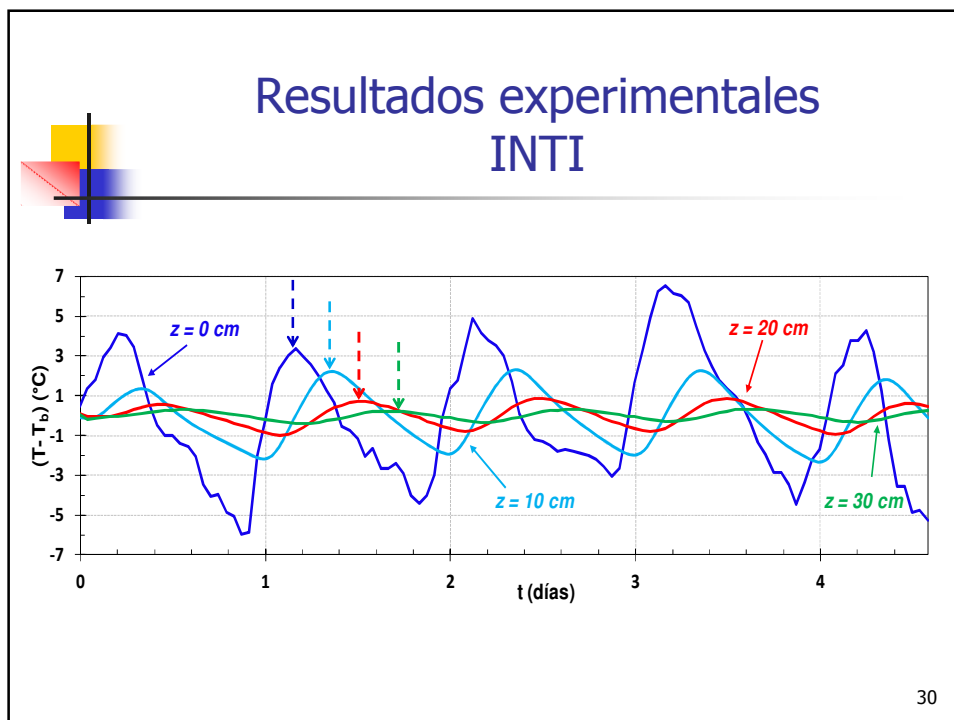
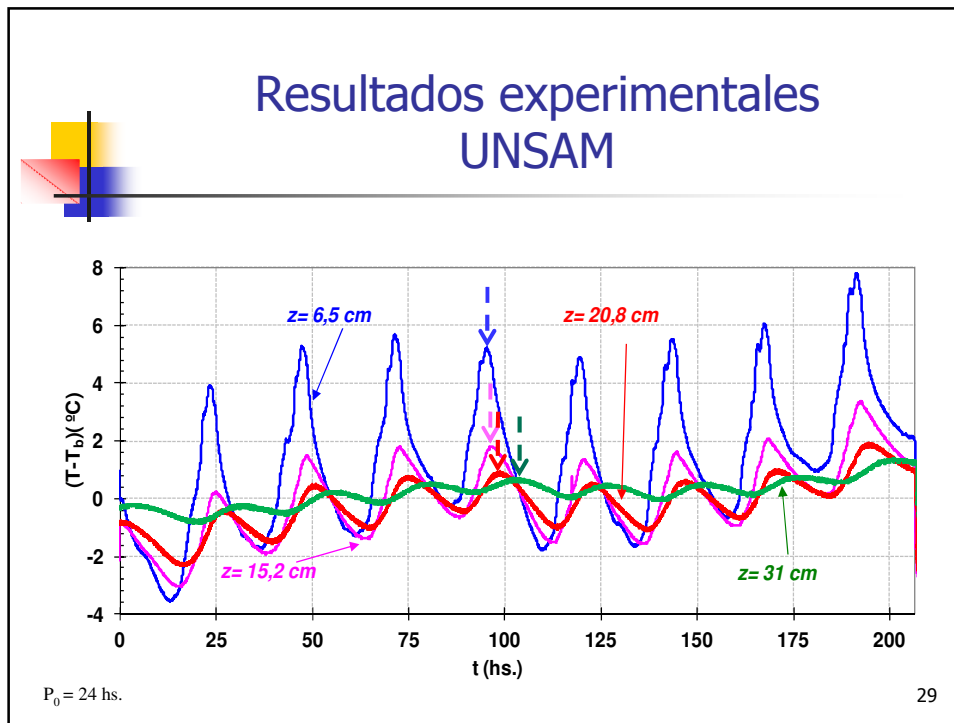
Interfase

Termómetros conectados a una PC

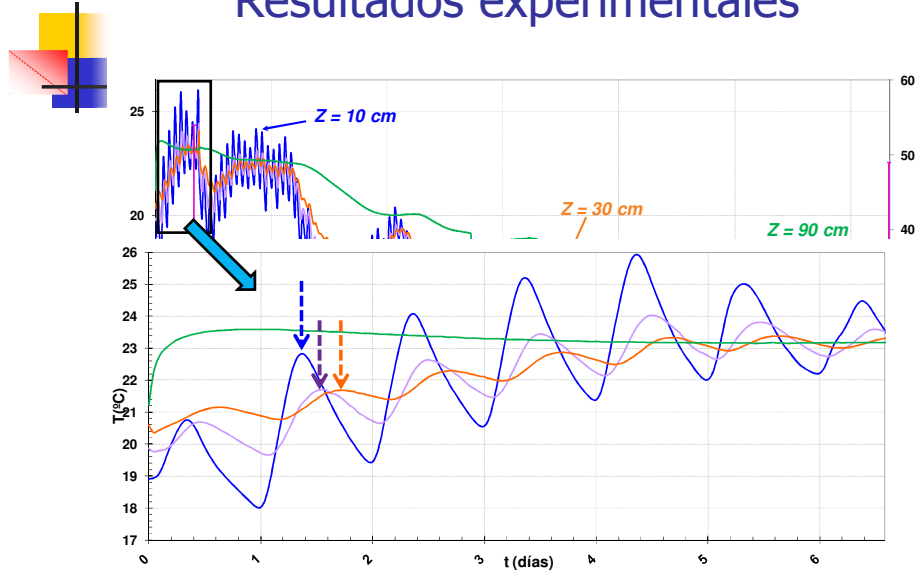
Suelo

$z$  Profund.

28

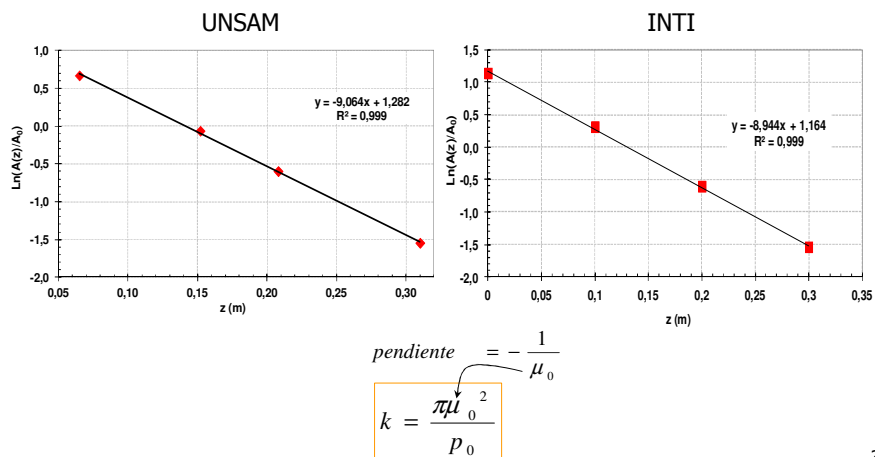


## Ondas de Calor del Suelo Resultados experimentales



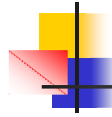
31

## Método de Atenuación

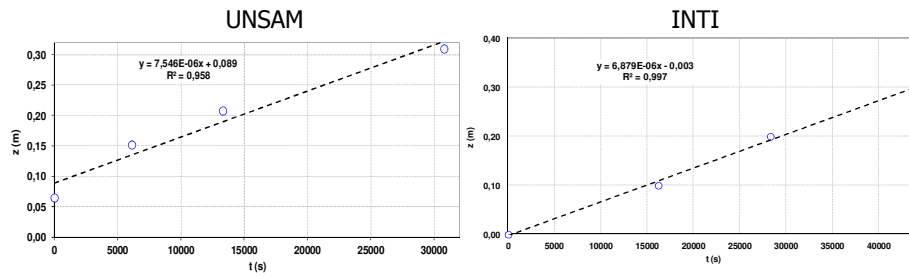


32





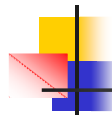
## Método de Desfasaje



pendiente  $= -v_0$

$$k = \frac{v_0^2 \cdot p_0}{4\pi}$$

33

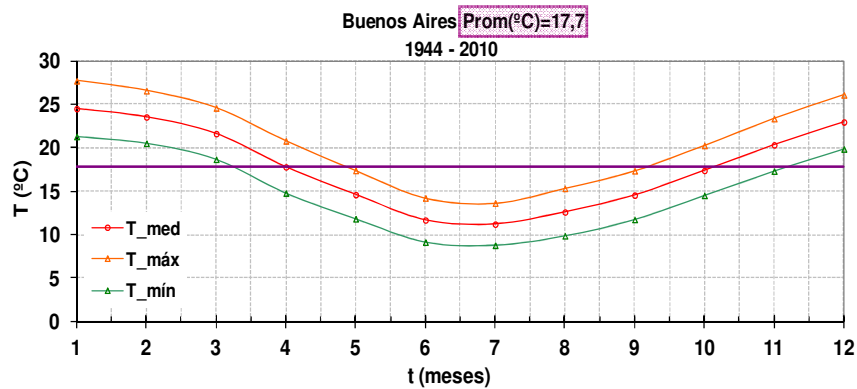


## Resultados obtenidos

Coeficiente de difusividad térmica ( $k$ )	Experimental ( $m^2/s \cdot 10^{-6}$ )		Tabulado ( $m^2/s \cdot 10^{-6}$ )	
	UNSAM	INTI	Arcilla	Arena
Método de atenuación	$0,44 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,04$	$0,26 - 0,4$	$0,296 - 0,521$
Método de desfasaje	$0,4 \pm 0,1$	$0,33 \pm 0,04$		
<b>Mejor valor de <math>k</math></b>	<b><math>0,44 \pm 0,03</math></b>	<b><math>0,39 \pm 0,06</math></b>	<b><math>0,26 - 0,4</math></b>	<b><math>0,296 - 0,521</math></b>

34

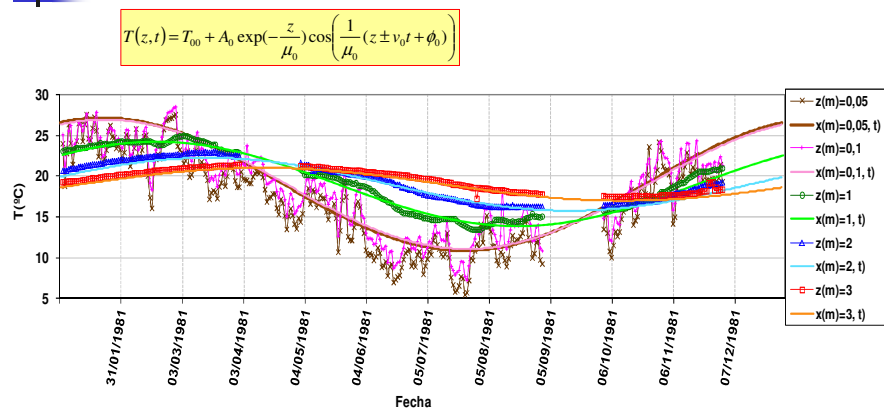
## Temperaturas de Buenos Aires Ciclo Anual



Referencia: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

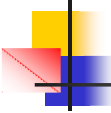
35

## Método de Ajuste. SMN



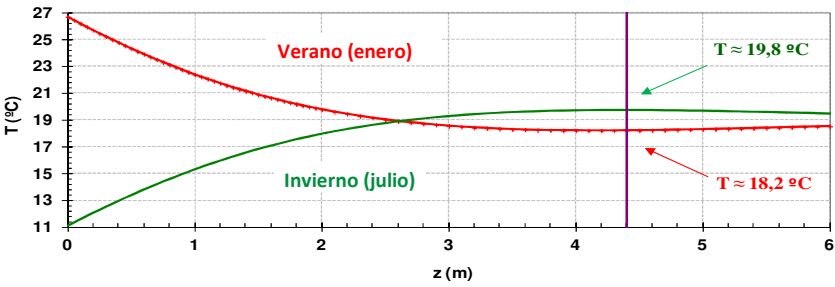
Referencia: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

36



# Temperaturas Tierra - Buenos Aires

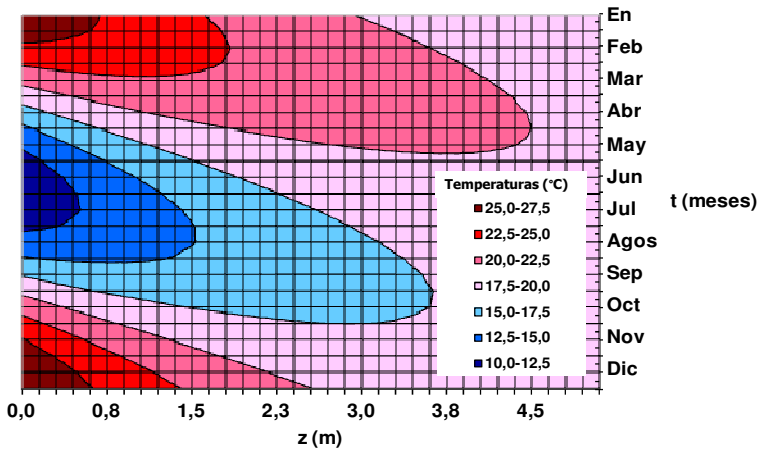
Información inferida a partir de los datos medidos



A una profundidad  $\approx 1 - 5$  m, la T del suelo es muy próxima a la T de confort todo el año.



# Temperaturas Tierra - Buenos Aires





## Conclusiones Parciales

- A una profundidad del orden de 4 m se produce una inversión de la temperatura (profundidad ideal para tubos enterrados).
- A partir de los 2 m la temperatura es aceptablemente estable y más accesible.

39



## Modelo 1 - Temperatura diarias del suelo usando Diferencias Finitas $T(z,t)$

Ecuación de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

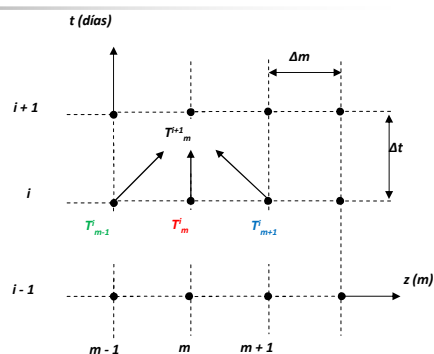
$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(z, t+1) - T(z, t)}{\Delta t}$$

$$\approx \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

$$T_m^{i+1} = T_m^i + \tau (T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i)$$

Nº de Fourier

$$\tau = \alpha \Delta t / \Delta z^2 \leq 1/2$$



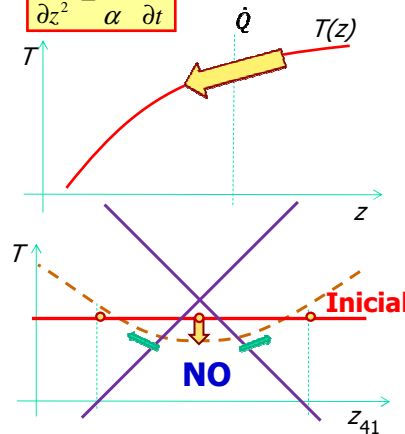
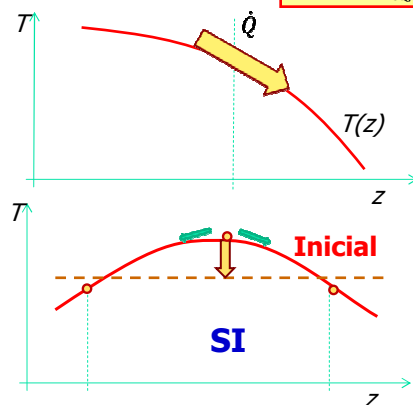
## Segunda Ley de la Termodinámica

Varios enunciados equivalentes.

- Uno de ellos: el calor siempre fluye de la fuente caliente a la fría

$$\dot{Q} = -k.A \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$



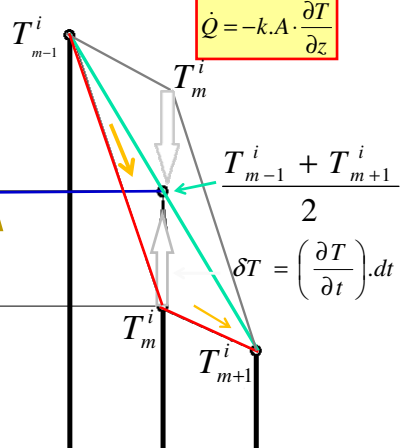
## Estabilidad

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\delta T \approx 2 \cdot \tau \cdot \Delta T$$

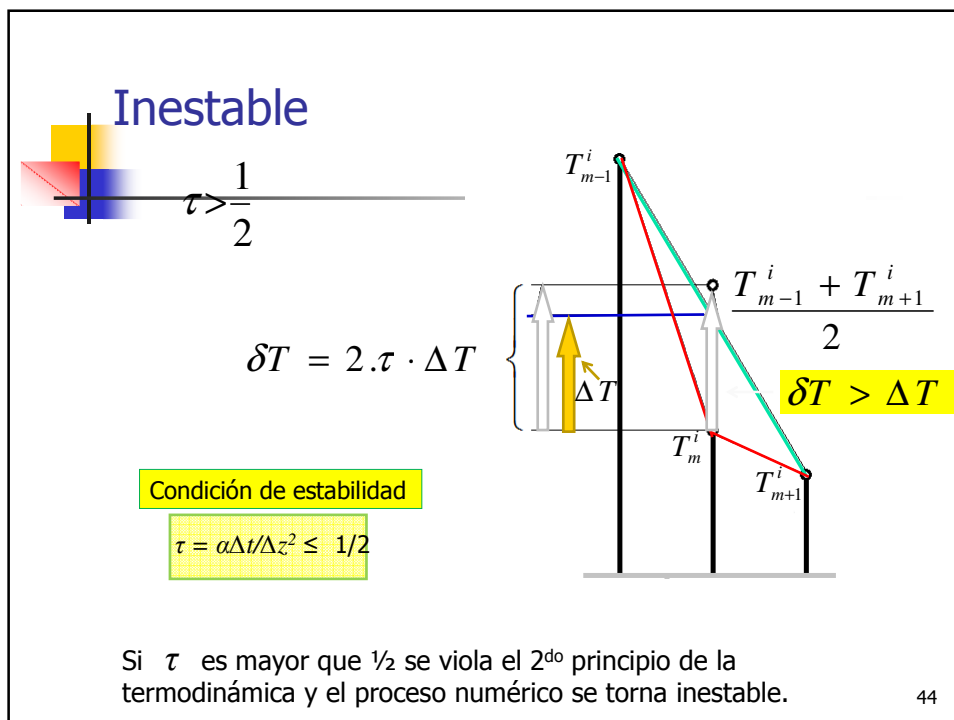
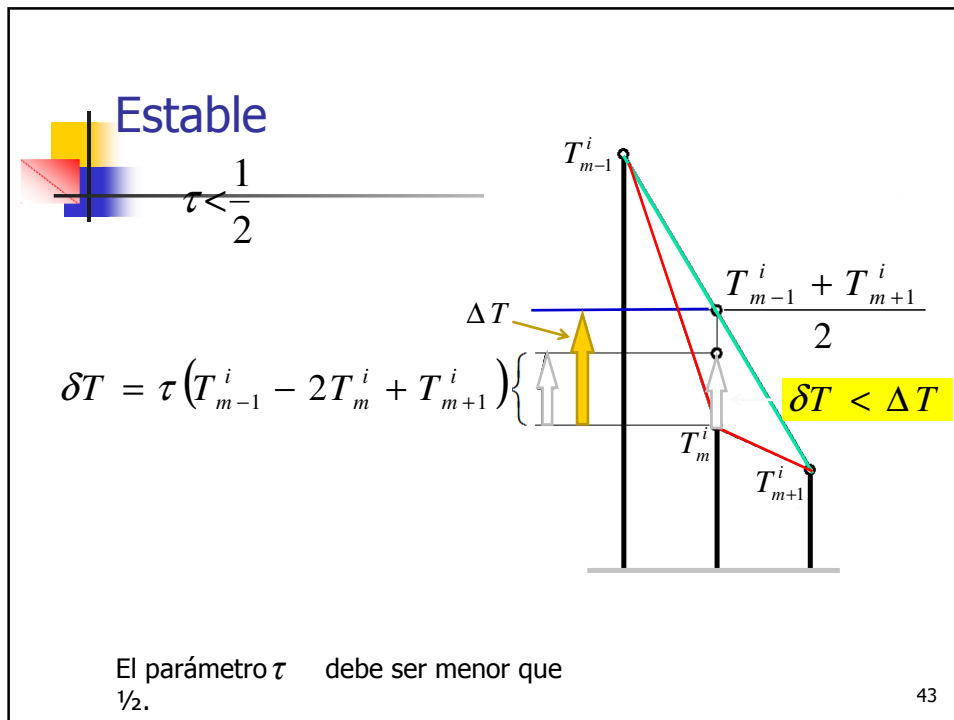
$$\dot{Q} = -k.A \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} (T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i) \left\{ \begin{array}{l} \text{Yellow arrow pointing up} \end{array} \right.$$

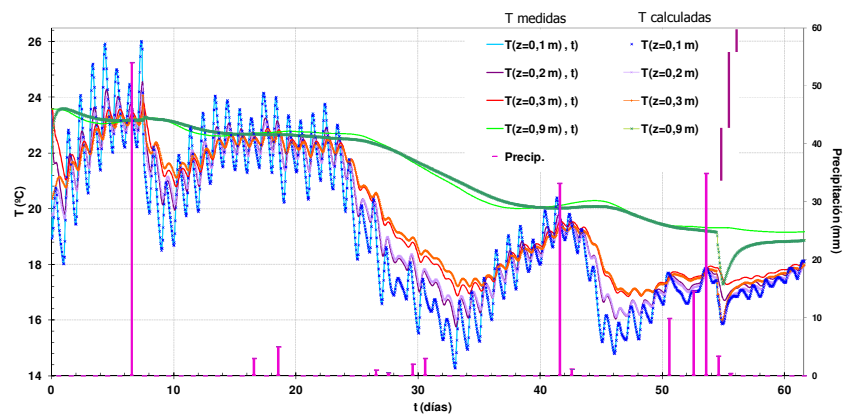


Avance de T en el tiempo

$$\delta T = \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \cdot dt \approx \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \cdot [T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i] = 2 \cdot \tau \cdot \Delta T$$



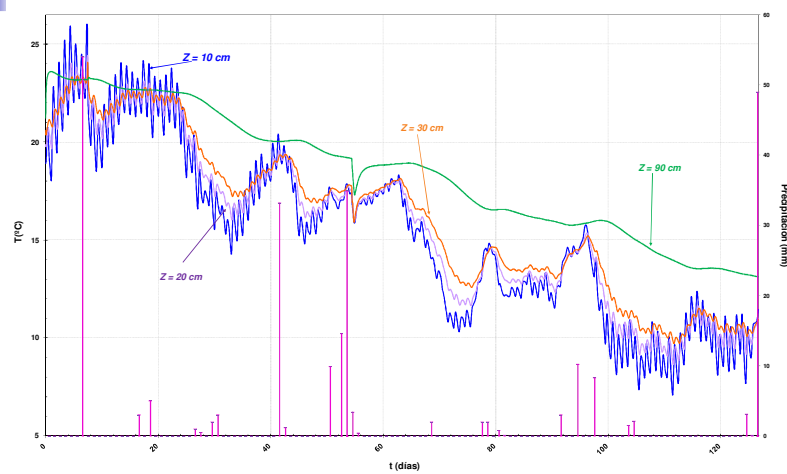
## Temperaturas medidas y calculadas con diferencias finitas



**El modelo ajusta adecuadamente los datos medidos !**

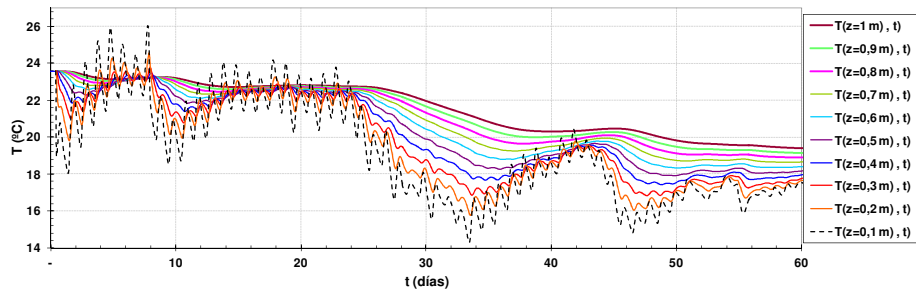
45

## Ondas de Calor del Suelo



46

## Predicción teórica de temperaturas



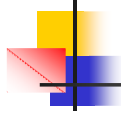
47

## Conclusiones Parciales

- El modelo se ajusta a los valores medidos de las  $T$  en función del  $t$  a diferentes profundidades.
- El modelo es adecuado para predecir las  $T$  a diferentes profundidades del suelo, época del año y  $t$ .

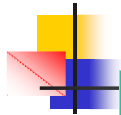
48



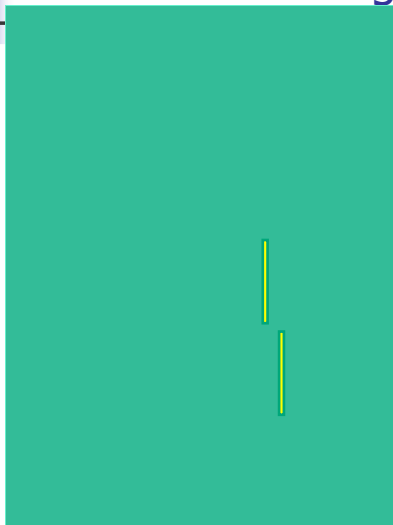


## La Tierra como Acondicionador de Aire Natural

49



## Efecto conocido y usado desde la antigüedad



Ruinas de Quilmes - siglo XV.  
Valle Calchaquí, Tucumán, Argentina

50

## Efecto conocido y usado desde la antigüedad



Ciudad de Gharyan, 60 km al sur de Trípoli, Libia

- Pozo 10 x 10 m
- 8 m profundidad
- $T_{interior} \approx 20 - 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  todo el año.
- $T_{exterior} \approx 30 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fuente: <http://www.clarin.com/suplementos/viajes/2008/03/16/v-01629375.htm>

51

## Casas subterráneas - Cuevas



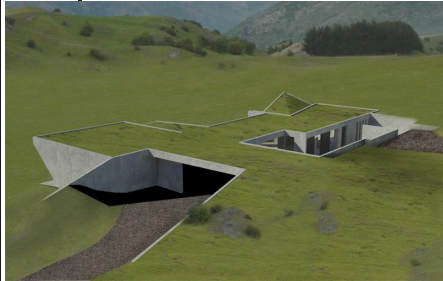
Gharyan, Libia



Coober Pedy, Australia Meridional

52

## Casas bajo tierra modernas



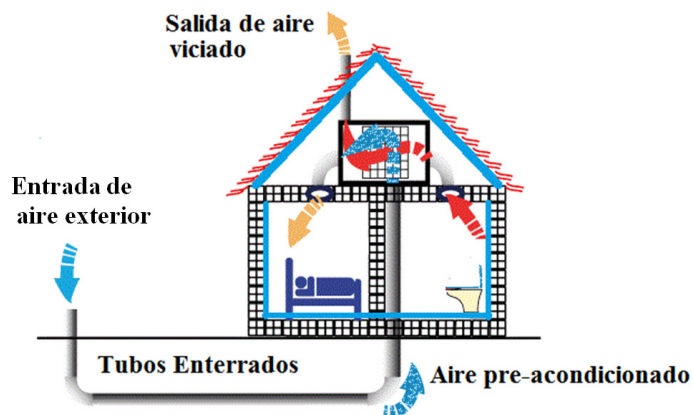
The Hills golf course  
near Arrowtown New  
Zealand (2009)

Earth-Sheltered  
Houses by Rob  
Roy EE.UU (2007)



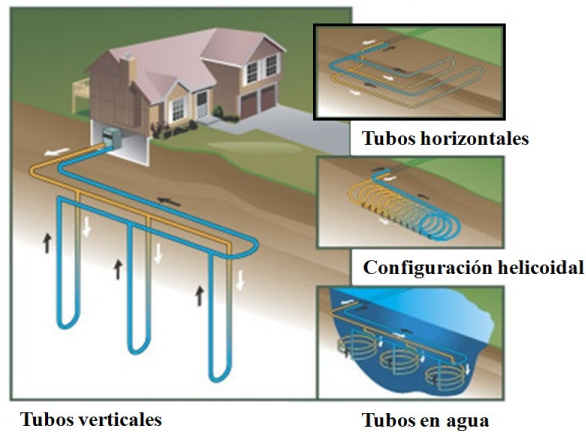
53

## Vivienda con tubos enterrados Acondicionamiento Térmico



54

## Acondicionamiento térmico de interiores



55

## CasaE de Basf – Tortuguitas, Buenos Aires, Argentina



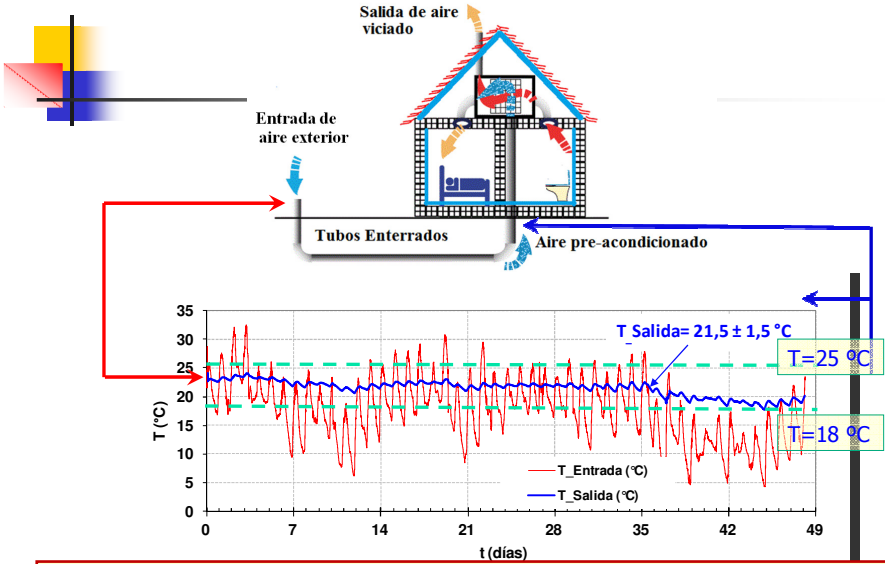
COLABORACIÓN

UNSAM- INTI –  
ENARGAS – BASF

Fuente: [www.lacasae.com.ar](http://www.lacasae.com.ar)

56

# Experimento CasaE de BASF

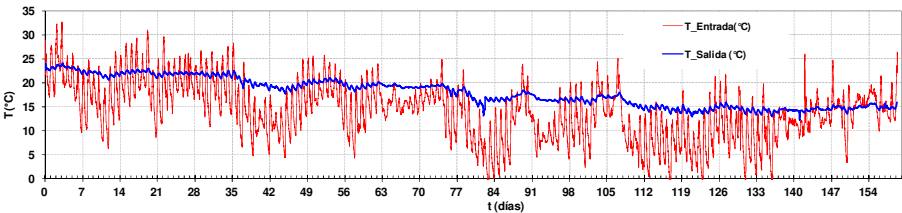


Las temperaturas de salida del tubo están siempre en la zona de confort (18  $^{\circ}\text{C}$  a 25  $^{\circ}\text{C}$ )!!!

Referencia: [www.lacasae.com.ar](http://www.lacasae.com.ar)

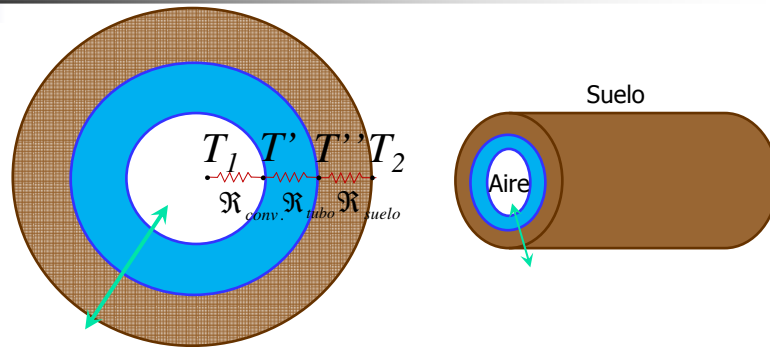
57

# Temperatura Entrada/Salida CasaE



58

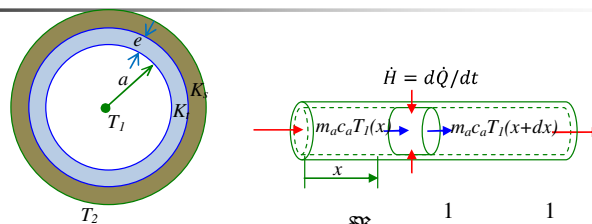
## Modelo 2- Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire



$$\mathcal{R}_{total} = \mathcal{R}_{conv.} + \mathcal{R}_{tubo} + \mathcal{R}_{suelo}$$

59

## Modelo del Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire



$$\mathcal{R}_{total} = \mathcal{R}_{conv.} + \mathcal{R}_{tubo} + \mathcal{R}_{suelo}$$

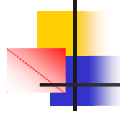
$$\mathcal{R}_{conv.} = \frac{1}{dA \cdot h} = \frac{1}{(2\pi \cdot a \cdot dx) \cdot h_a}$$

$$\mathcal{R}_{tubo} = \frac{\ln\left(1 + \frac{e}{a}\right)}{2\pi \cdot K_t \cdot dx}$$

$$\mathcal{R}_{suelo}^{(1)} = \frac{\ln[2z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

$$\mathcal{R}_{suelo}^{(2)} = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi \cdot K_s \cdot dx} = \frac{\ln[z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

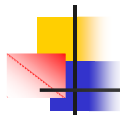
60



$$\lambda_{(1)} = \frac{c_a \rho_a \cdot Q_a}{2\pi \cdot K_t} \cdot \left[ \frac{K_t}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + K_t \frac{\ln[2z/(a+e)]}{K_s} \right]$$

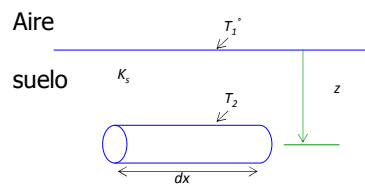
$$\lambda_{(2)} = \frac{c_a \rho_a \cdot Q_a}{2\pi \cdot K_t} \cdot \left[ \frac{K_t}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + K_t \frac{\ln[z/(a+e)]}{K_s} \right]$$

61



## Modelo del Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire (cont.)

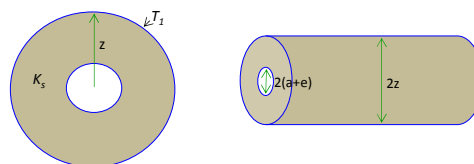
Tubo en un medio finito (1)



$$\delta R_{suelo}^{(1)} = \frac{\ln[2z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

Tubo en un medio cilíndrico (2)

$z$  = profundidad



$$\delta R_{suelo}^{(2)} = \frac{\ln[z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

62

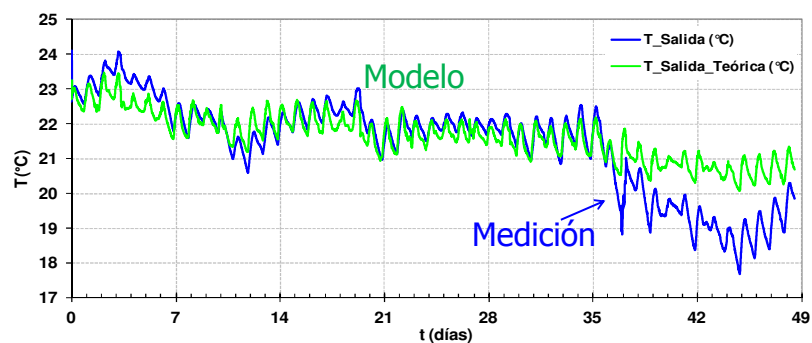
## Modelo del Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire (cont.)

Temperatura del aire, después de viajar un longitud  $x$  de tubo

$$T(x) = T_{suelo} + (T_{amb}^{\circ} - T_{suelo}) \cdot e^{-x/\lambda}$$

63

## Modelo T salida del tubo



$\lambda=29$  m

64



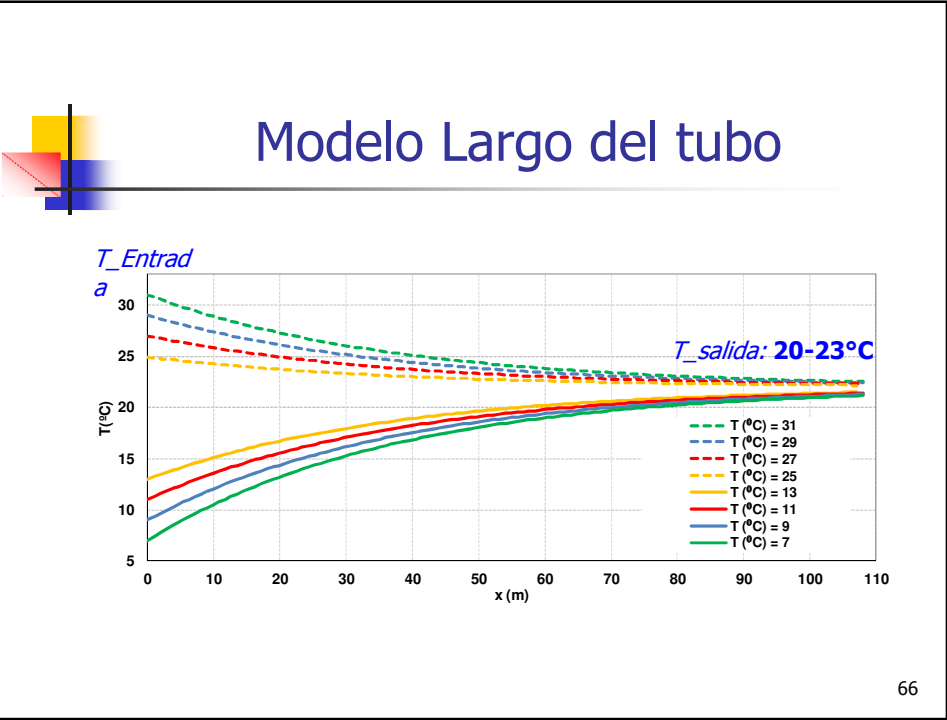
# Material del tubo

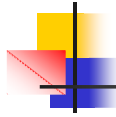
Modelo	$\lambda_{conv}$ (m)	$\lambda_{tubo}$ (m)	$\lambda_{suelo}$ (m)	$\lambda_{total}$ (m)
$\lambda_{(1)}$	0,7	4,88	31,85	37,43
$\lambda_{(2)}$			25,87	31,45

Material_tubo	$\lambda_{tubo}$ (m)	$\lambda_{total}$ (m)
Aluminio	0,00643	32,5
Bronce	0,00892	32,5
Cobre	0,00356	32,5
Plomo	0,03847	32,6

Material tubo usado: Policloruro de Vinilo (PVC)  
Partículas de plata

65

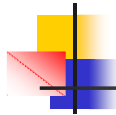




## Conclusiones Parciales

- ✚ Flujo de aire a la salida con  $T$  prácticamente constante y muy próxima a la de "confort"
- ✚ Se obtuvo un buen ajuste entre las mediciones de  $T$  del aire a la salida del tubo y las calculadas teóricamente.
- ✚ Este método permite calcular la longitud optima del tubo
- ✚ Ejemplo de sistema Eficiente del uso de la energía
- ✚ ↓ Uso de la energía ↓ GEI

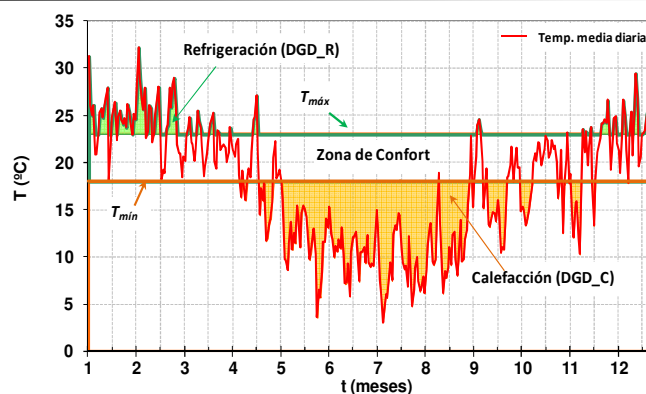
67



## Factor de ahorro de energía en el acondicionamiento térmico

Conceptos:

- ✓ DGD\_R
- ✓ DGD\_C



$$DGD\_R = \sum_{\text{Año}} (T_m(t) - T_{máx}) \Big|_{T(t) > T_{máx}}$$

$$DGD\_C = \sum_{\text{Año}} (T_{mín} - T_m(t)) \Big|_{T(t) < T_{mín}}$$

68

## Potenciales ahorros de Energía DGD\_R, DGD\_C y DGD<sub>total</sub>

### Buenos Aires

	2010	2011	2012	Promedio	Porcentaje
DGD_R	259	205	289	251	21%
DGD_C	959	1000	951	970	79%
DGD <sub>total</sub>	1218	1205	1240	1221	100%

← Refrigeración  
← Calefacción

	Exterior	Tubos	Factor de Ahorro
DGD_R	56	5,5	90%
DGD_C	1002	332	67%
DGD <sub>total</sub>	1058	338	68%

← Refrigeración  
← Calefacción  
← Ahorro

16/03/12 hasta 23/11/12

69

## Conclusiones Finales

- La energía geotérmica ofrece una importante oportunidad para disminuir los consumos energéticos
- Importaciones y emisiones de GEI
- En la zona central de Argentina, puede servir tanto para: la **calefacción** en invierno como para la **refrigeración** en verano

70



“La energía más limpia y barata, es la que nunca se usa”

71



**Muchas Gracias!**

**Agradecimientos:**

Jorge Fiora (INTI)  
Pablo Romero (INTI)  
Pedro Cozza (INTI)  
Ángel Bermejo (INTI)  
Roberto Prieto (ENARGAS)  
Enrique Bezzo (ENARGAS)  
Horacio Raiano (BASF)  
Pablo Azqueta (Arquitecto- CasaE)  
Oscar Romanelli (UNSAM)  
Javier Fernández Vázquez (UNSAM)

72