



# Acumulación estacional de energía solar en acuífero para acondicionamiento térmico

*Jornadas de investigación del LES- 2022*

*Federico González, Pedro Galione, Alfonso Flaquer,  
Lidio Braga, Pedro Curto*



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

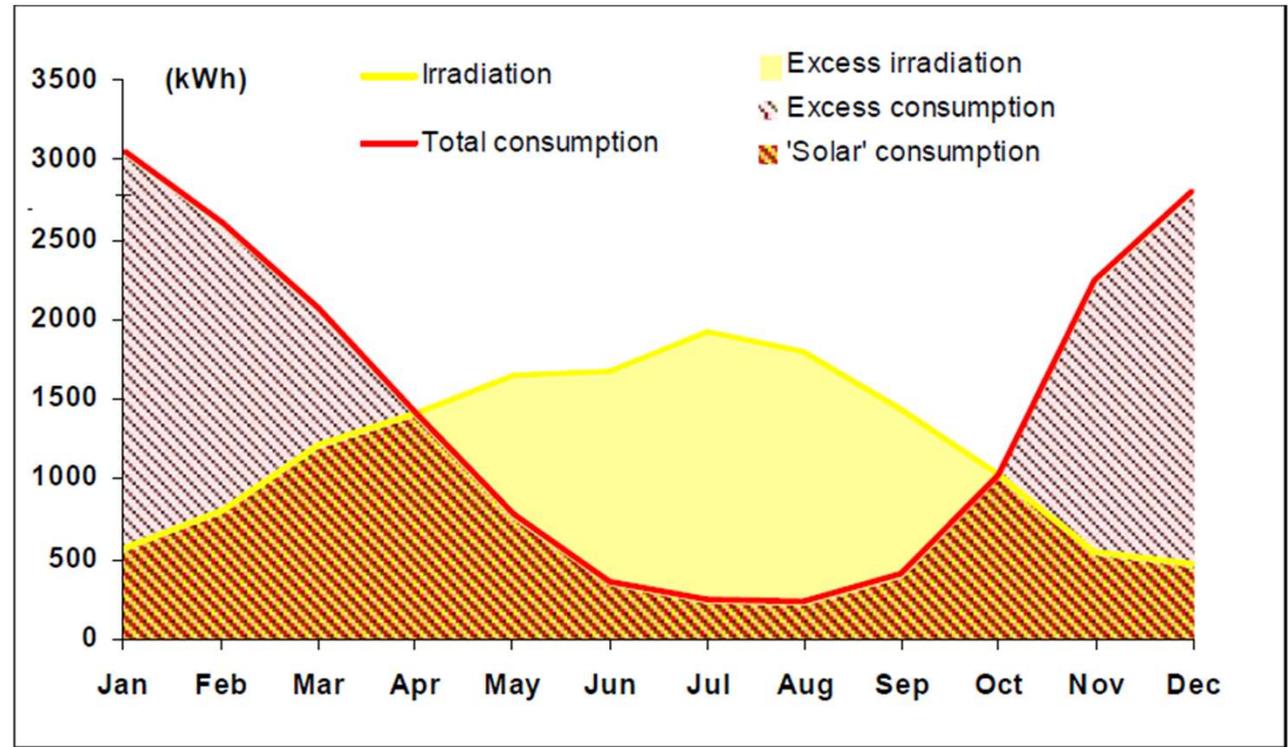


LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

# Acumulación estacional de calor/frío

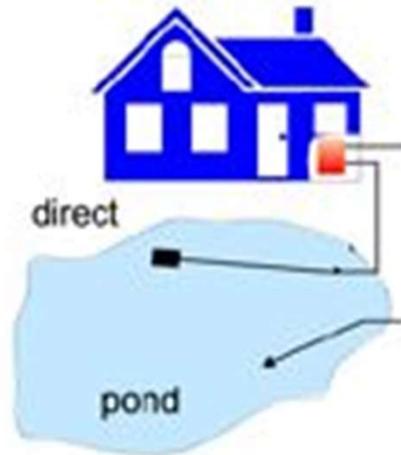
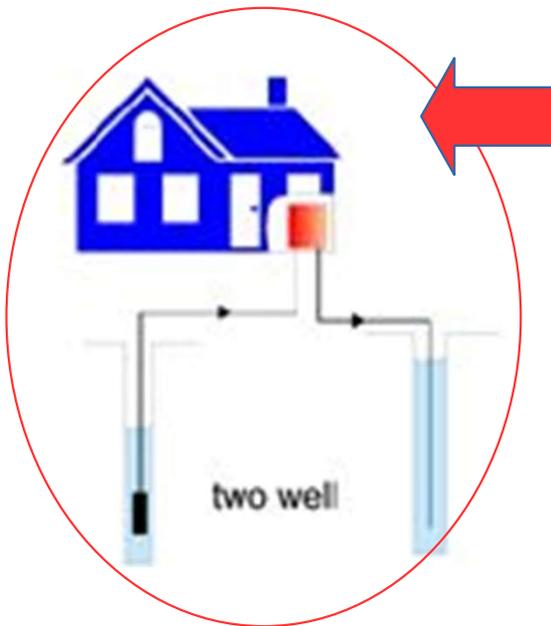
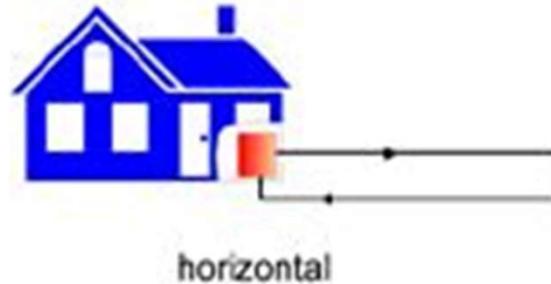
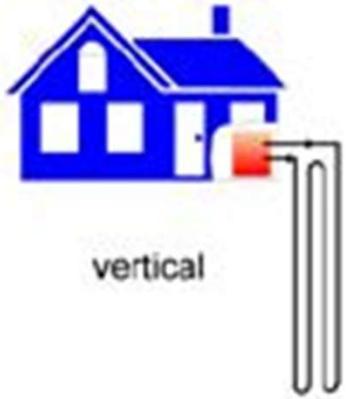
## Energía solar:

- Desfasaje entre la demanda de calor (invierno) y la disponibilidad del recurso (verano)

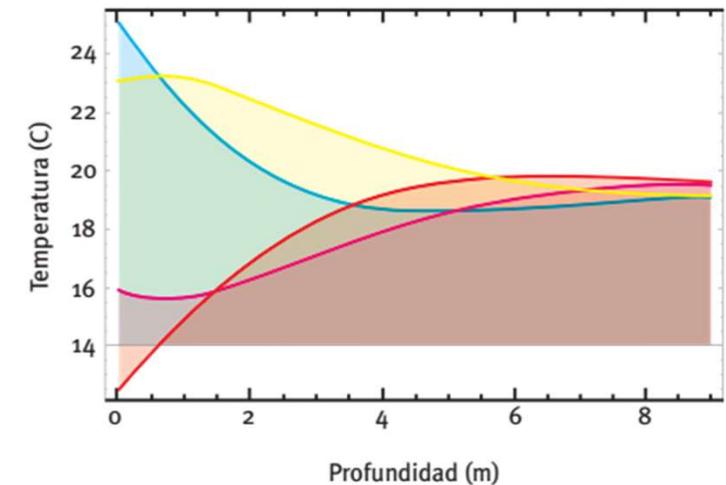


- Acumulación del exceso en verano para su uso en invierno (calefacción, agua caliente sanitaria)
- Uso del subsuelo (grandes volúmenes)
- Permite aumentar fracción solar del sistema

# Acumulación/intercambio con el subsuelo: tipos



- **Sistemas “cerrados”**: se circula un fluido en un sistema cerrado para intercambiar energía con el subsuelo.



- **Sistemas “abiertos”**: agua subterránea/superficial se usa como fluido para llevar la energía térmica dentro y fuera del acuífero/superficie de agua.

# Objetivos del proyecto (FSE-ANII)

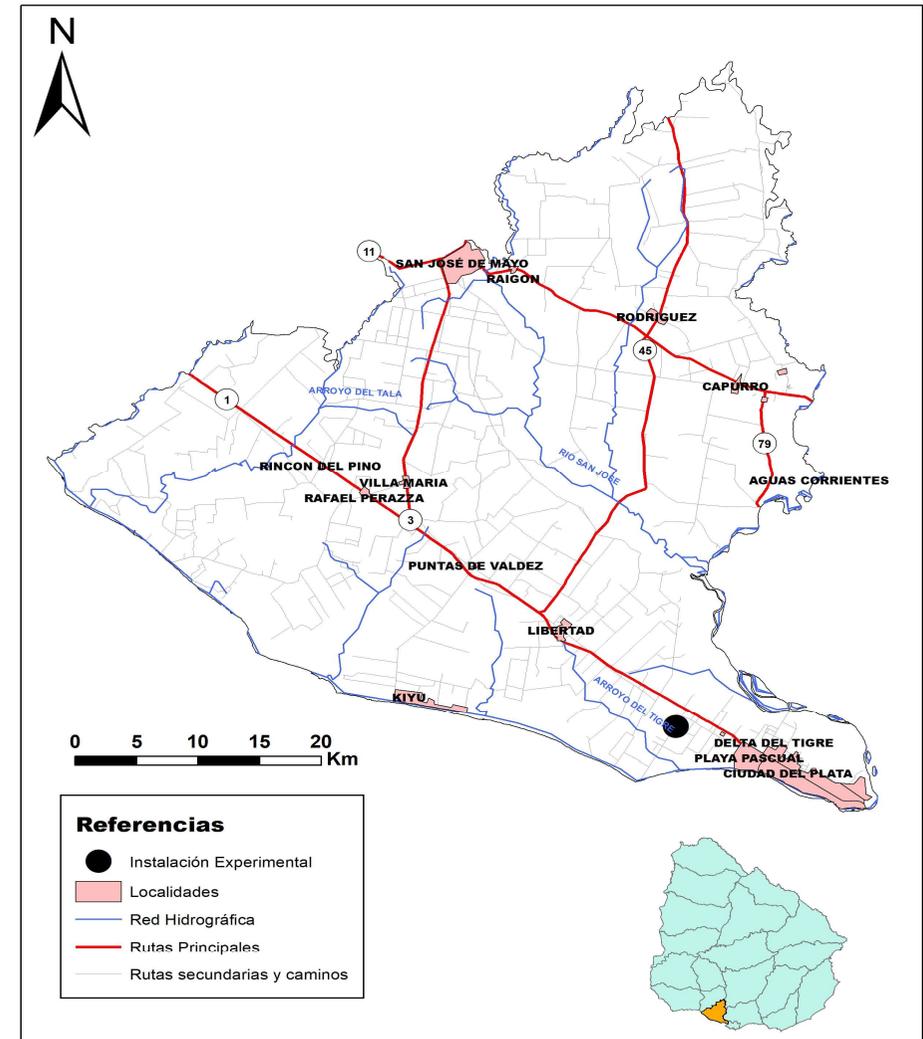
- Desarrollo y utilización de **modelos computacionales** de análisis de sistemas de acumulación en acuífero para predicción de funcionamiento y diseño
- Diseño e implementación de una **instalación experimental**
- Obtención de datos experimentales para **validación de modelos**

# Instalación experimental

- Ubicado sobre el **Acuífero Raigón**, en Colonia Wilson.

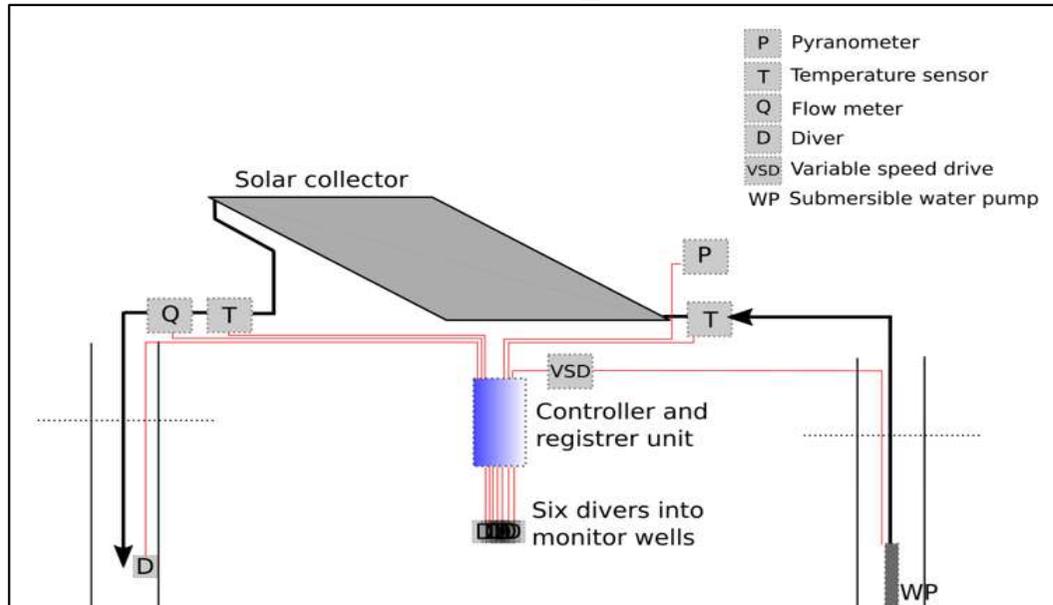
## Características del Acuífero:

- Medio sedimentario, compuesto por **arenas y gravas**.
- Espesor aproximado: 30 m
- Gradiente: 1/500 m/m
- Conductividad Hidráulica: 6.7 m/día
- Velocidad Darcy: **0.013 m/día**
- Temperatura del agua: **17 – 18 °C**



Sistema Acuífero Raigón

# Instalación experimental



## INYECCIÓN (VERANO)

Se extrae agua del acuífero la cual es **calentada por paneles solares** para luego ser inyectada en el acuífero a **36 ° C**. El sistema se regula ajustando el caudal para asegurar la temperatura de inyección.

## EXTRACCIÓN (INVIERNO)

Se extrae agua del pozo “caliente” y se mide caudal y temperatura, con lo cual se calcula la energía recuperada, y con esto el **rendimiento de acumulación**.

## MONITOREO

Se monitorea la temperatura en el acuífero mediante “sensores” instalados en 5 pozos monitores.

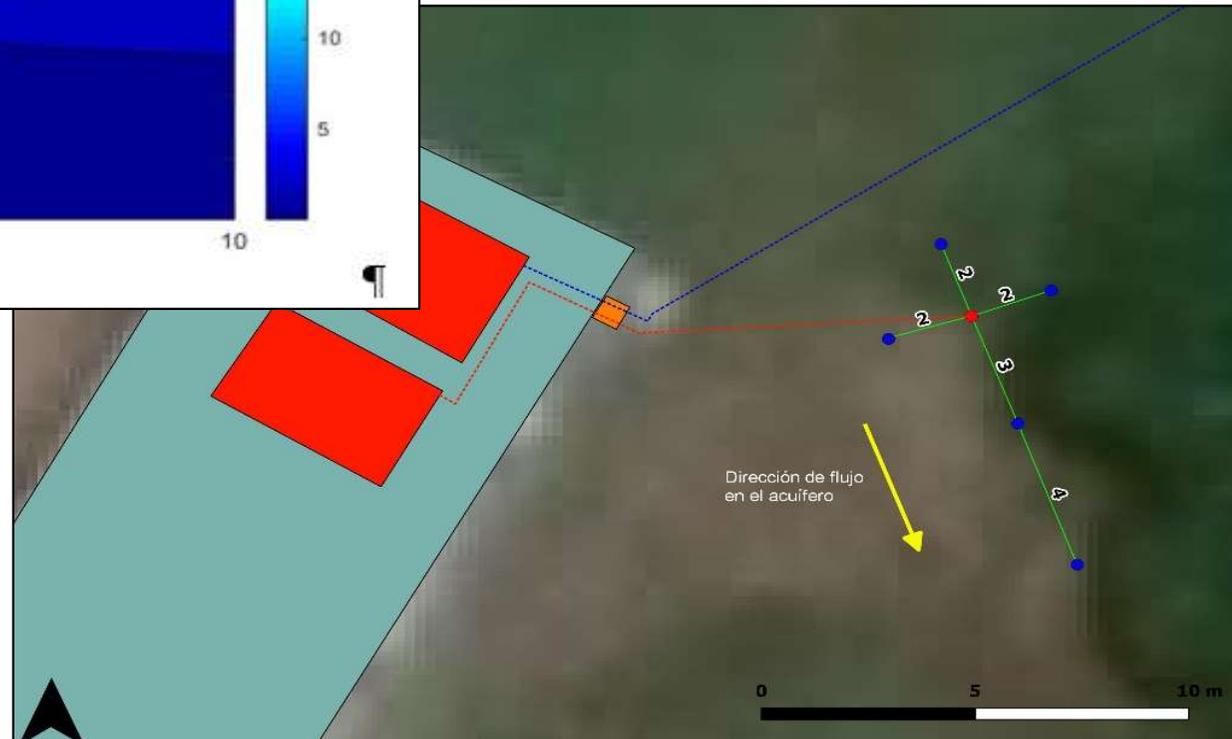
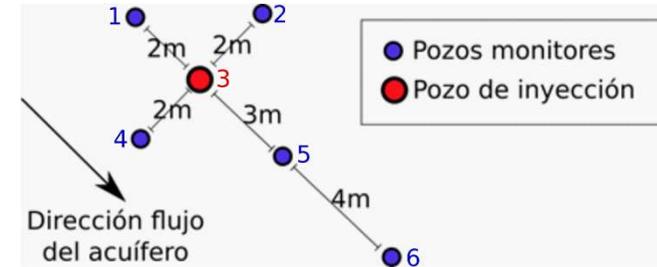
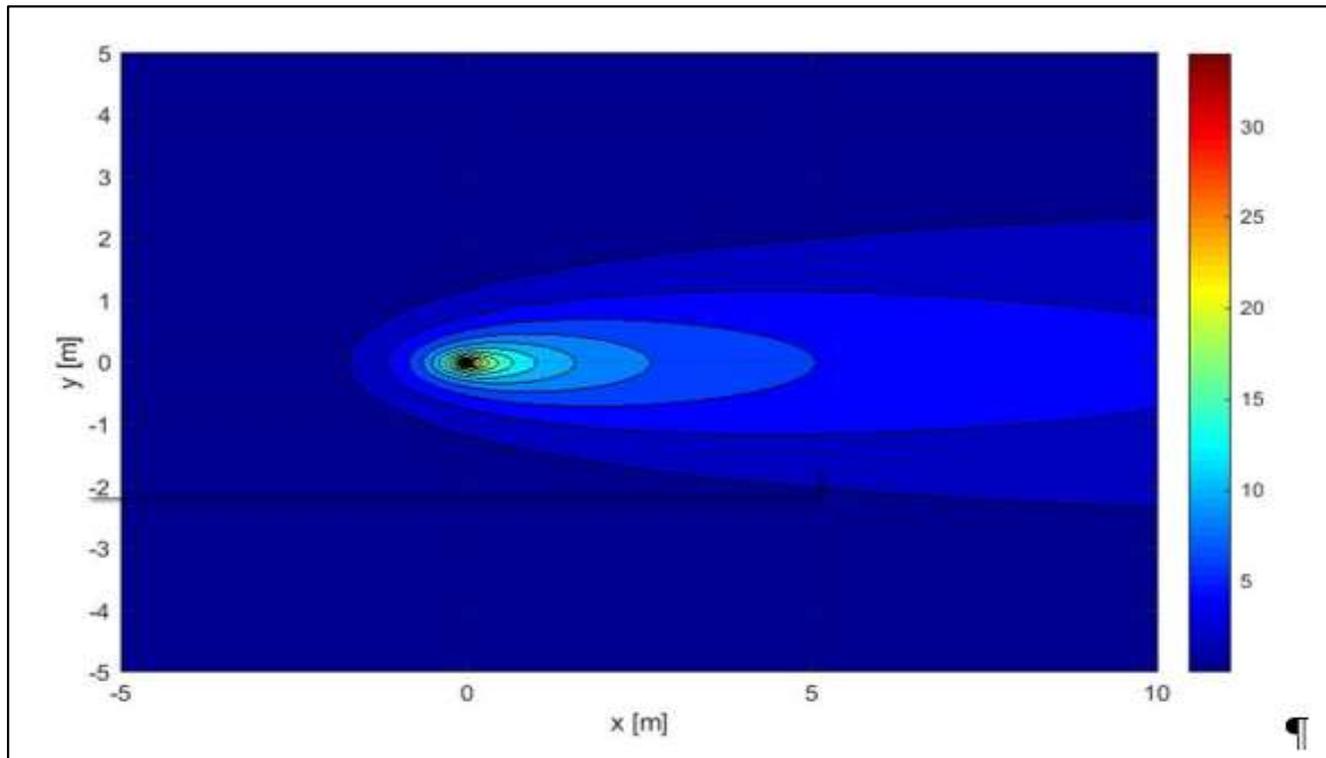
# Modelo analítico (prediseño)

- **Modelo 2D** de “línea infinita” vertical (fuente de calor; pozo) en movimiento (velocidad del agua subterránea), considerando **advección, conducción y dispersión del calor**.
- Permite calcular la **temperatura en un plano horizontal** (perpendicular a la línea infinita de inyección/extracción de calor) luego de transcurrido un tiempo  $t$  :

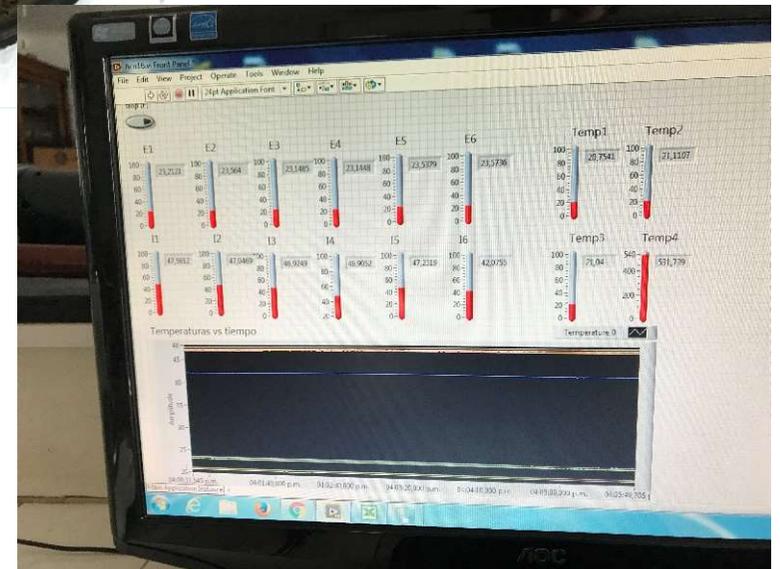
$$T(x, y, t) = T_0 + \frac{q_{tb}}{4\pi C_m \sqrt{D_{t,L} D_{t,T}}} \int_0^t \exp \left[ \frac{-[x - u_t \cdot (t - t')]^2}{4D_{t,L} \cdot (t - t')} - \frac{y^2}{4D_{t,T} \cdot (t - t')} \right] \times \frac{dt'}{(t - t')}$$

- Se busca lograr **variaciones “medibles” en la temperatura** en las inmediaciones del pozo de inyección, a distancias adecuadas para instalación de pozos monitores.
- Se utiliza para **elegir la ubicación de los pozos monitores**, y verificar que el tamaño de la zona de **afectación al terreno** sea “adecuada”.

# Modelo analítico (prediseño)

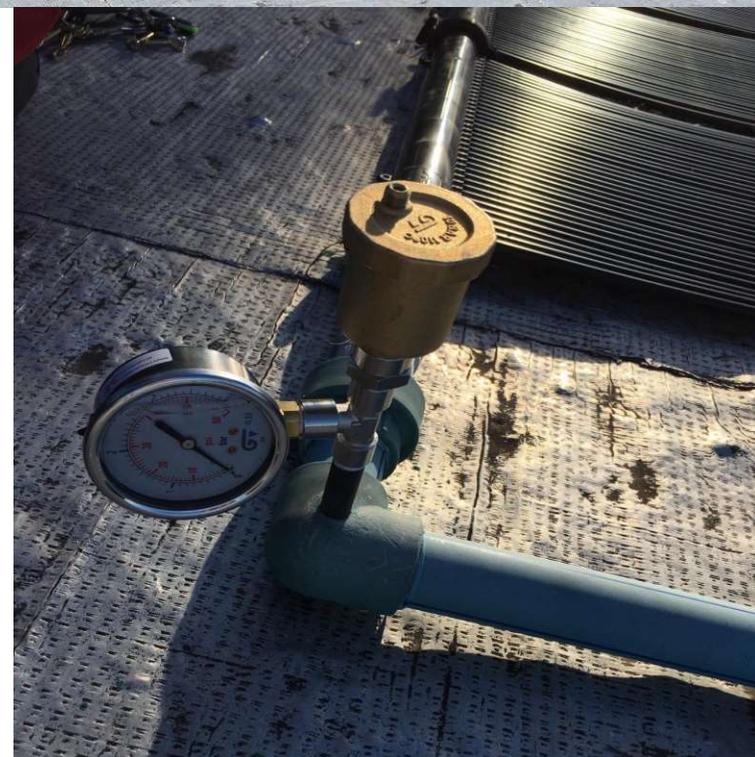


# Ensayos de conductividad



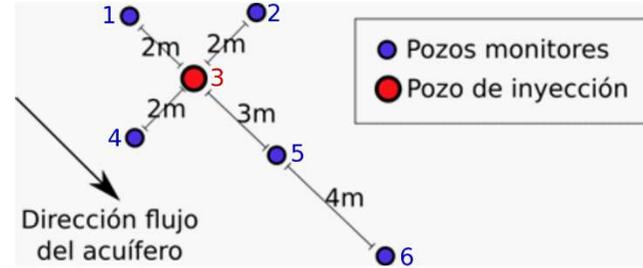






# Resultados experimentales

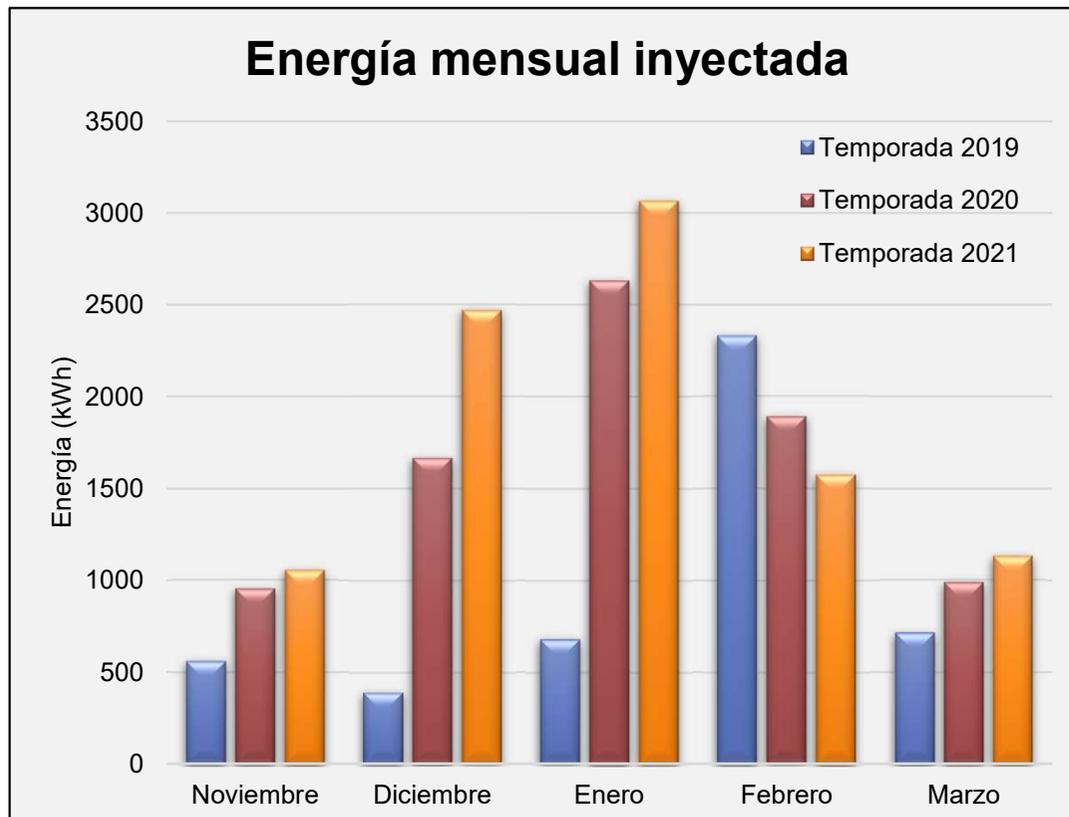
## MONITOREO (sistema telemetría)



# Resultados experimentales

Potencia calorífica inyectada:  $\dot{Q} = \dot{m}C_p(T - T_{ref})$

Energía inyectada en la temporada  $E_{temp} = \int \dot{Q} dt$



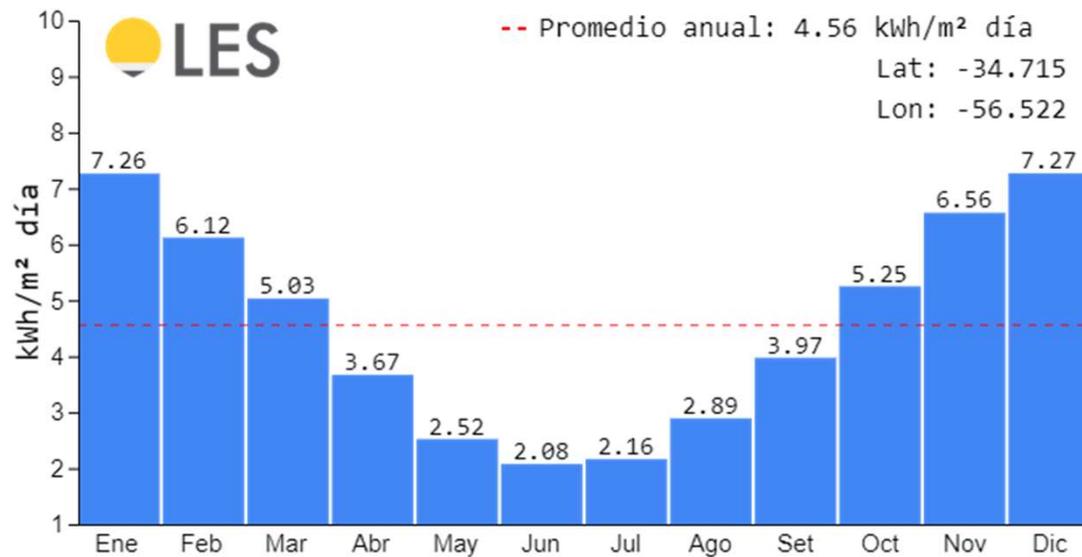
	Energía inyectada total (kWh)
2019	4679
2020	8451
2021	9424

Mientras que en la primera temporada el funcionamiento de la instalación **fue parcial**, en la segunda se logró inyectar agua caliente prácticamente en la **totalidad del periodo** y según las especificaciones previstas. En la tercer temporada me **mejoró el control** aumentando la energía.

# Resultados experimentales

Energía disponible cada temporada:

*Irradiación mensual solar en plano horizontal para la locación de Colonia Wilson. Fuente: Laboratorio de Energía Solar (LES).*



Temporada	Porcentaje energía inyectada de la energía solar disponible (%)
2019	15,34
2020	27,64
2021	32,37

# Resultados experimentales

## Extracción

Al momento, se ha extraído agua del acuífero en la temporada 2020 y 2021.

Se planteó el uso de un caudal constante durante 6hs, simulando la utilización para una bomba de calor para refrigeración.

## Resultados

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T - T_{ref}) \quad T_{ref}=18^{\circ}\text{C}$$

Energía extraída 2020 = 1247 kWh                      14,6% de lo inyectado

Energía extraída 2021 = 1228 kWh     $\longrightarrow$     13,0% de lo inyectado



En 2021 el sistema dejó de extraer un tiempo antes que en 2020, posible razón para que sea menor la energía extraída.

En ambos casos el porcentaje extraído es pequeño. Se destaca que las dimensiones del sistema son pequeñas generando que las pérdidas relativas sean altas al inyectar energía en el acuífero.

# Pasos siguientes:

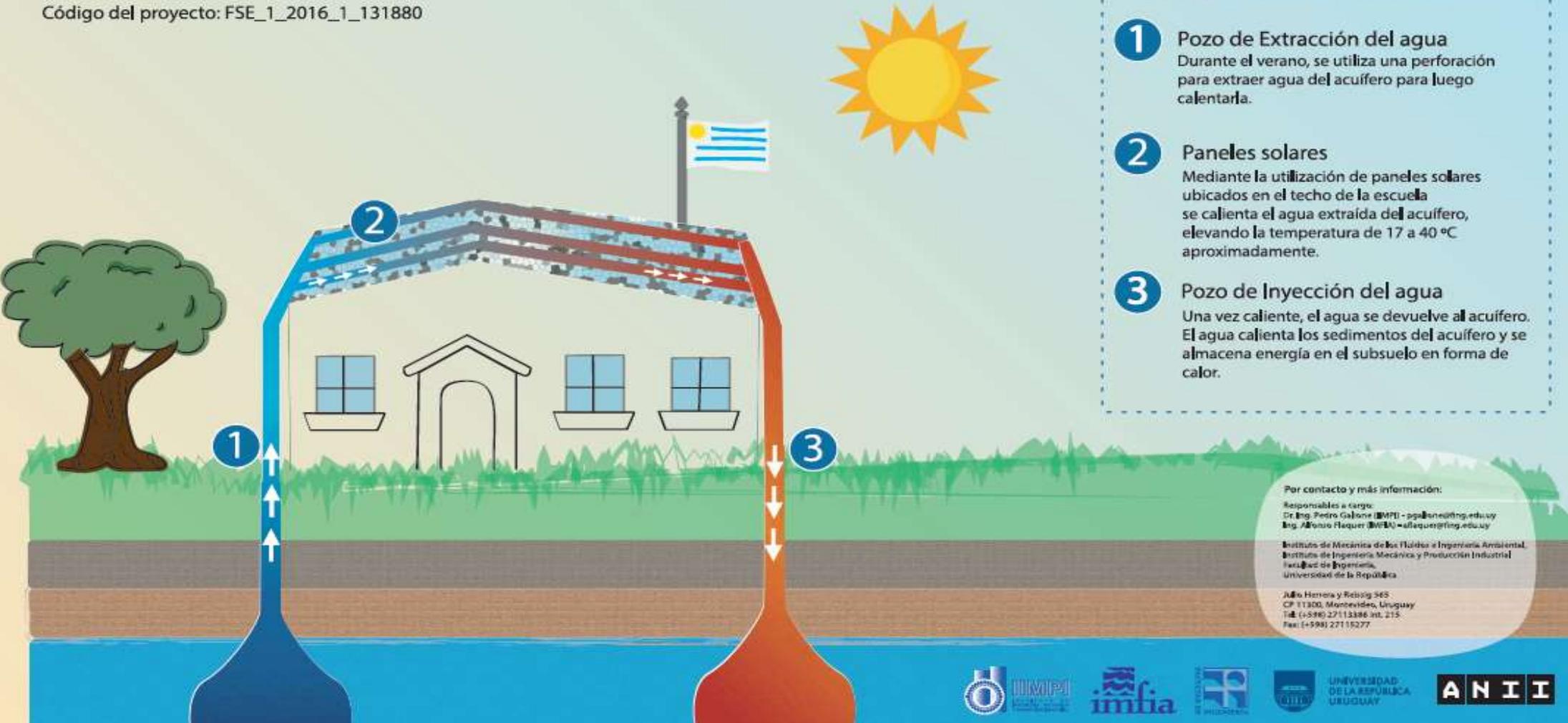
- Completar caracterización de acuífero: propiedades relevantes, comportamiento de las temperaturas en la vertical (perfiles verticales de temperaturas)
- Ajuste y validación de simulación: en proceso.
  
- **Futuro:**
  - Diseño y implementación de bomba de calor para acondicionamiento térmico
  - Evaluación de implementación bomba de calor en distintos escenarios (aire, agua de acuífero, acumulación solar)

# Interacción con el medio y divulgación



# Instalación experimental

Código del proyecto: FSE\_1\_2016\_1\_131880





# Gracias!

*Federico González Madina*  
*fgonzalez@fing.edu.uy*

