

JORNADA TÉCNICA SOBRE IMPLANTACIÓN PLAN DE ACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS



Asociación Internacional de Hidrogeólogos
Grupo Español

EL FUTURO DE LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Jorge Jódar Bermúdez

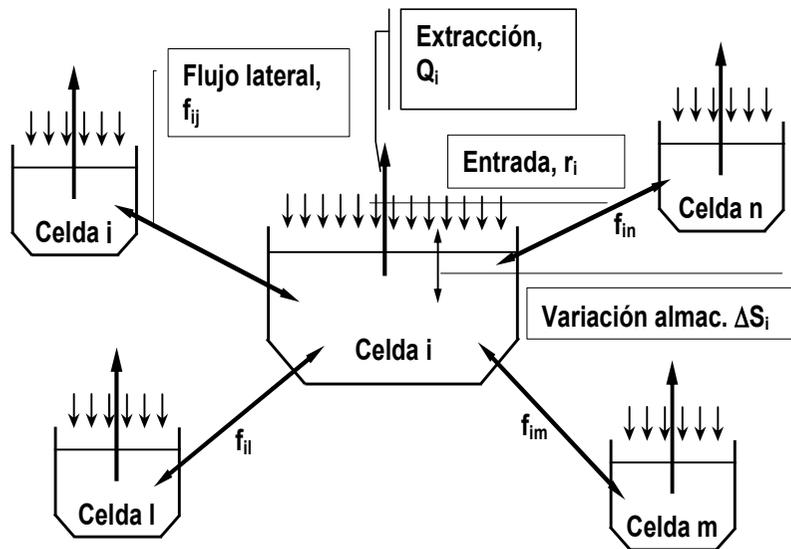
Vicedirección Científica/Departamento de Aguas y Cambio Global



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿De dónde venimos?

Modelos numéricos son herramientas de GESTION CONTABLE

Variación de Almacenamiento = Entradas + Salidas



La realidad se aproxima estableciendo el balance entradas-salidas en cada celda. Un modelo es un sistema contable.

Superficie: 100 km²

Precipitación (P) : 500 mm/año

Recarga: 50 mm/yr → 5 hm³/año

Precio= 0.32 €/m³

Ingresos = 1.6 M€/año

¿Suficiente para hacer contabilidad?

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿De dónde venimos?



Mining & Metals



Civil Engineering



Geothermal
Energy



Environmental
Services

Ecuación general de flujo

$$S_s \frac{\partial h(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{j} + f \quad \text{on } \Omega$$

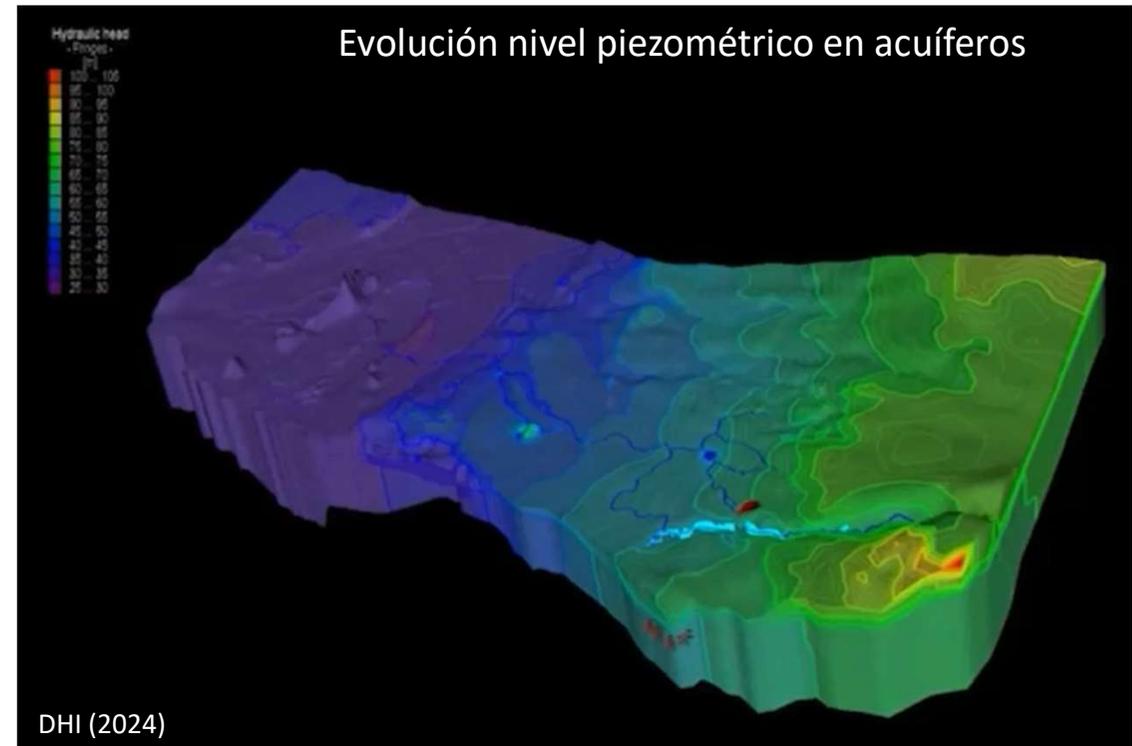
$$\mathbf{j} = -\mathbf{K} \nabla h$$

Condiciones iniciales

$$h_0(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x}, t = 0)$$

Condiciones de contorno

$$(f\mathbf{K}\nabla h) \cdot \mathbf{n} = \alpha(H - h) + Q_0 \quad \text{on } \Gamma$$



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿De dónde venimos?



Mining & Metals



Civil Engineering



Geothermal
Energy



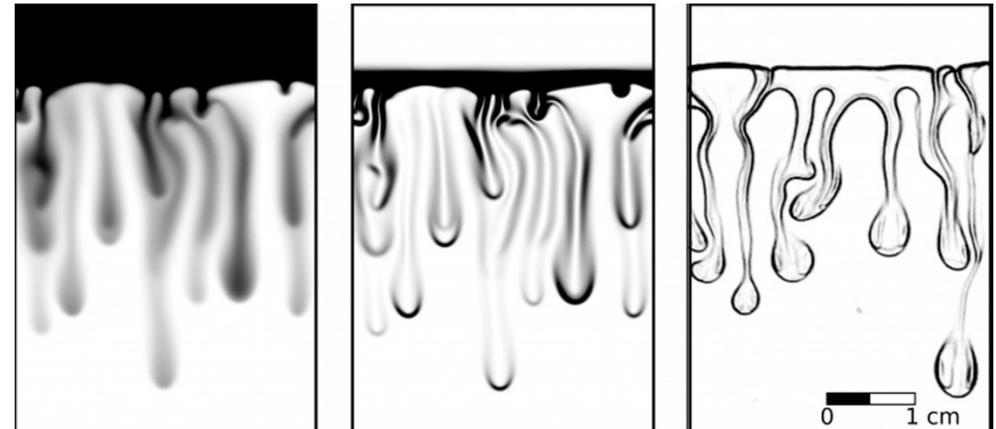
Environmental
Services

Ecuación general de flujo et al.

$$\frac{\partial \left((\omega_g^w \rho_g S_g + \omega_l^w \rho_l S_l) \phi \right)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^w + \mathbf{j}_l^w) + f^w$$

$$\frac{\partial \left((\omega_g^a \rho_g S_g + \omega_l^a \rho_l S_l) \phi \right)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^a + \mathbf{j}_l^a) + f^a$$

Almacenamiento CO2 en acuíferos salinos



Hidalgo et al. (2012)

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿De dónde venimos?



Mining & Metals



Civil Engineering



Geothermal
Energy



Environmental
Services

Ecuación general de flujo et al.

$$\frac{\partial \left((\omega_g^w \rho_g S_g + \omega_l^w \rho_l S_l) \phi \right)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^w + \mathbf{j}_l^w) + f^w$$

$$\frac{\partial \left((\omega_g^a \rho_g S_g + \omega_l^a \rho_l S_l) \phi \right)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^a + \mathbf{j}_l^a) + f^a$$

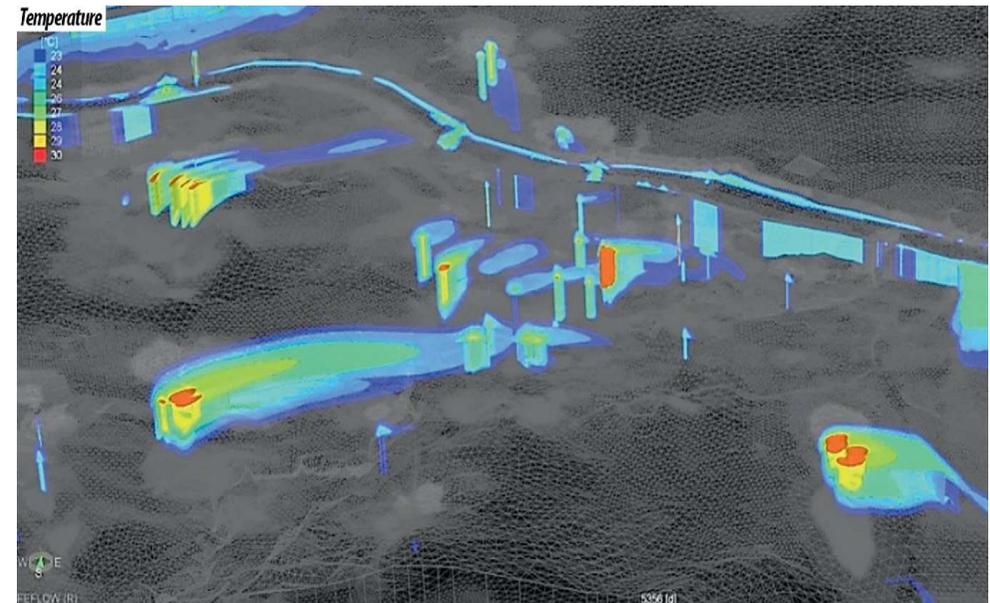
$$\frac{\partial (e_g \rho_s (1 - \phi) + e_g \rho_g S_g \phi + e_l \rho_l S_l \phi)}{\partial t} - \frac{\phi S_g P_g}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} =$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{es} + \mathbf{j}_{eg} + \mathbf{j}_{el}) + f^Q$$

$$\frac{\partial (h_s \rho_s (1 - \phi) + h_g \rho_g S_g \phi + h_l \rho_l S_l \phi)}{\partial t} - \phi S_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} =$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{hs} + \mathbf{j}_{hg} + \mathbf{j}_{hl}) + f^Q$$

Transporte de Calor en acuíferos



García-Gil et al. (2022)

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿De dónde venimos?



Mining & Metals



Civil Engineering



Geothermal
Energy



Environmental
Services

Ecuación general de flujo et al.

$$\frac{\partial ((\omega_g^w \rho_g S_g + \omega_l^w \rho_l S_l) \phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^w + \mathbf{j}_l^w) + f^w$$

$$\frac{\partial ((\omega_g^a \rho_g S_g + \omega_l^a \rho_l S_l) \phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{j}_g^a + \mathbf{j}_l^a) + f^a$$

$$\frac{\partial (e_g \rho_s (1 - \phi) + e_g \rho_g S_g \phi + e_l \rho_l S_l \phi)}{\partial t} - \frac{\phi S_g P_g}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} =$$

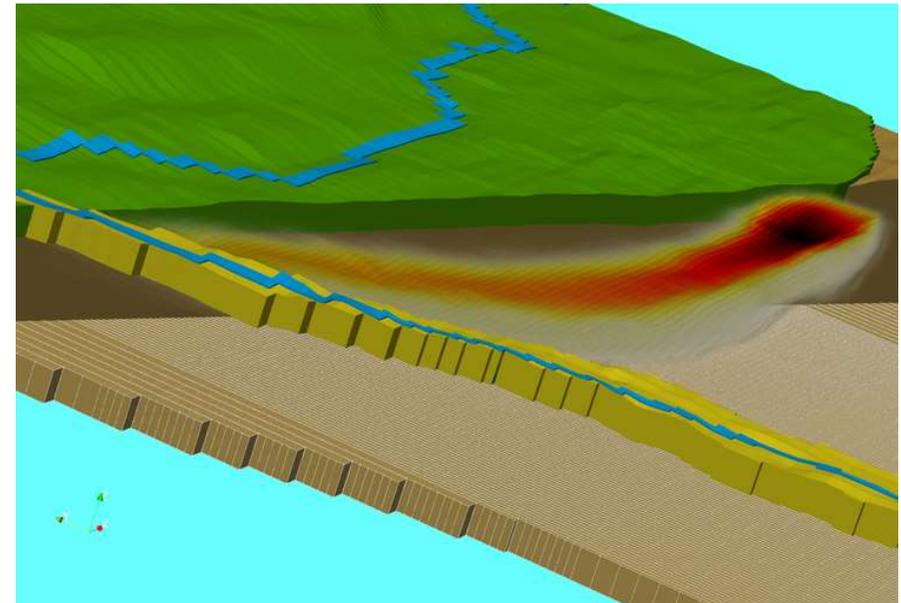
$$\nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{es} + \mathbf{j}_{eg} + \mathbf{j}_{el}) + f^q$$

$$\frac{\partial (h_s \rho_s (1 - \phi) + h_g \rho_g S_g \phi + h_l \rho_l S_l \phi)}{\partial t} - \phi S_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} =$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{hs} + \mathbf{j}_{hg} + \mathbf{j}_{hl}) + f^q$$

$$\frac{\partial (R \phi C)}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha_L |\mathbf{j}_l^w| + \phi D_f) \nabla C - \mathbf{j}_l^w \cdot \nabla C + F$$

Transporte de Contaminantes



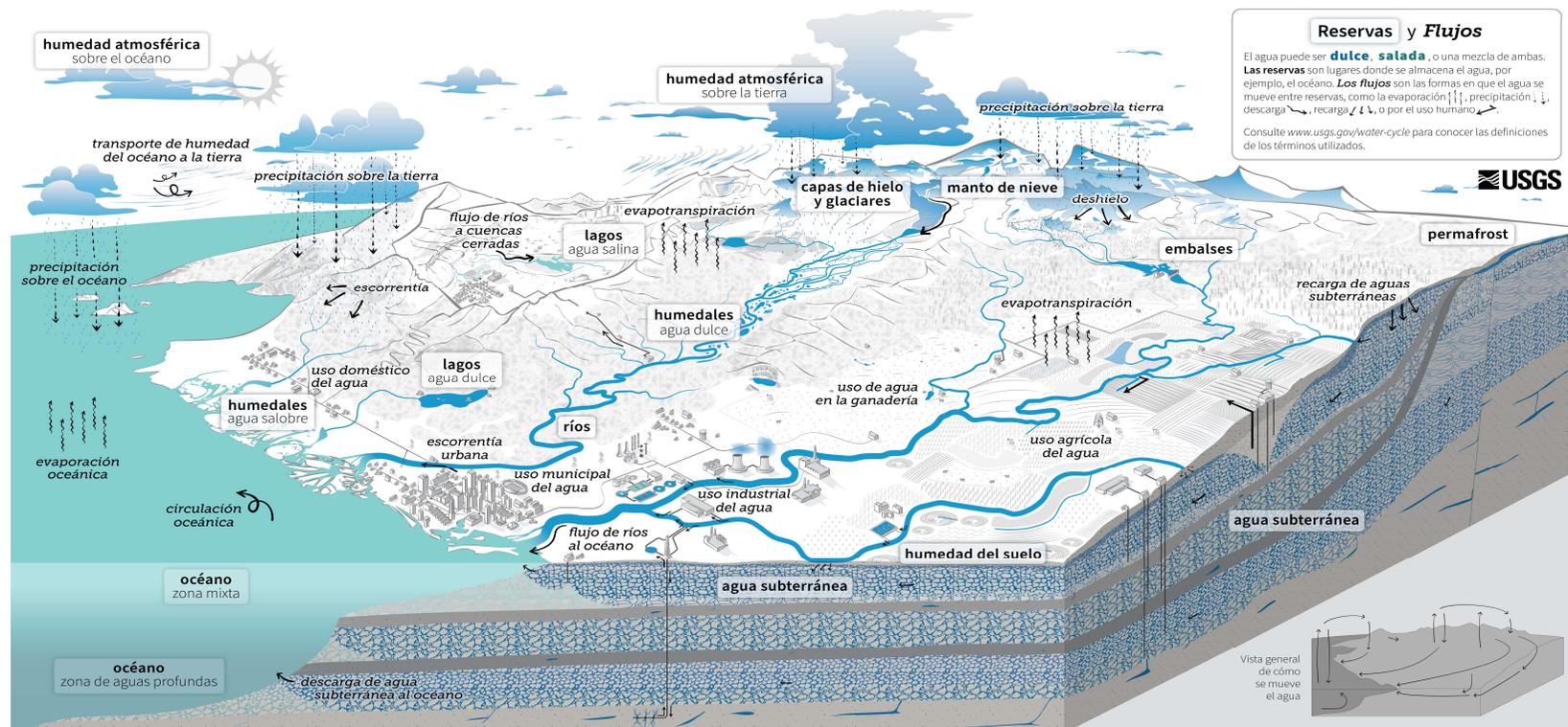
Montoya (2022)

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Aumentar los procesos acoplados
Procesos no lineales con las variables de estado



Incremento complejidad de resolución del
Sistema de Ecuaciones Diferenciales (SED)



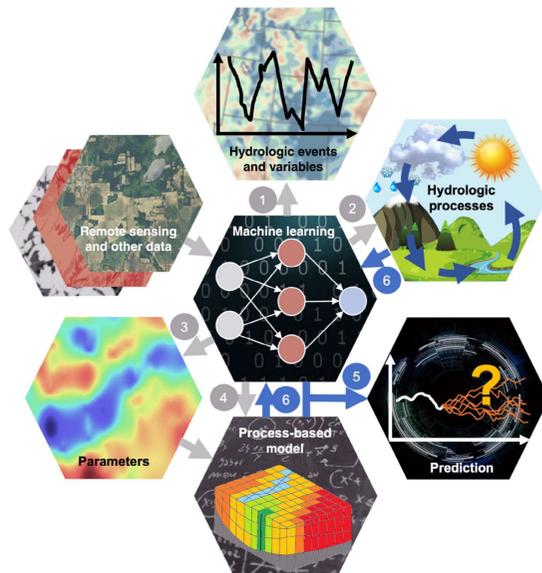
Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Aumentar los procesos acoplados
Procesos no lineales con las variables de estado



Incremento complejidad de resolución del
Sistema de Ecuaciones Diferenciales (SED)

Modelos Híbridos (SED + AI)



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

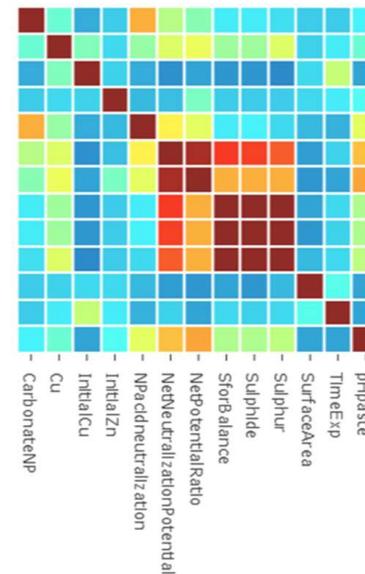
Alojamiento de Gemelos Digitales en el Cloud para convertir los moldes en Herramientas reales de Gestión

AquaLearning: Machine Learning for Water Management



Platform to predict the behaviour of aquatic systems at real time developed applying machine learning algorithms.

The **innovation** is that **AquaLearning** allows for quick detection of several features such as minority and trace pollutants, groundwater levels, etc., using only available rutinary information.



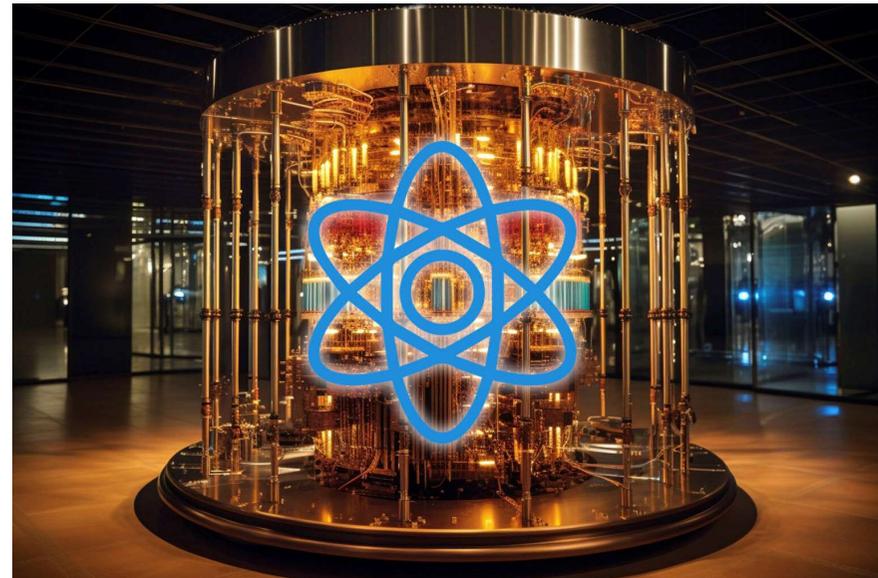
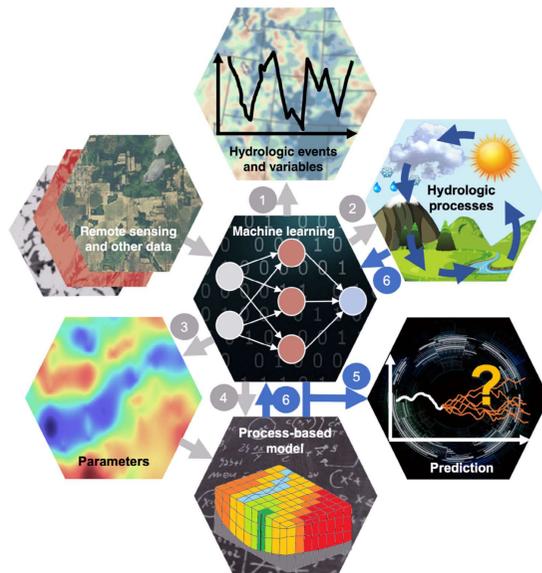
Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Aumentar los procesos acoplados
Procesos no lineales con las variables de estado



Incremento complejidad de resolución del
Sistema de Ecuaciones Diferenciales (SED)

Modelos Híbridos (SED + AI) + Ordenadores Cuánticos



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

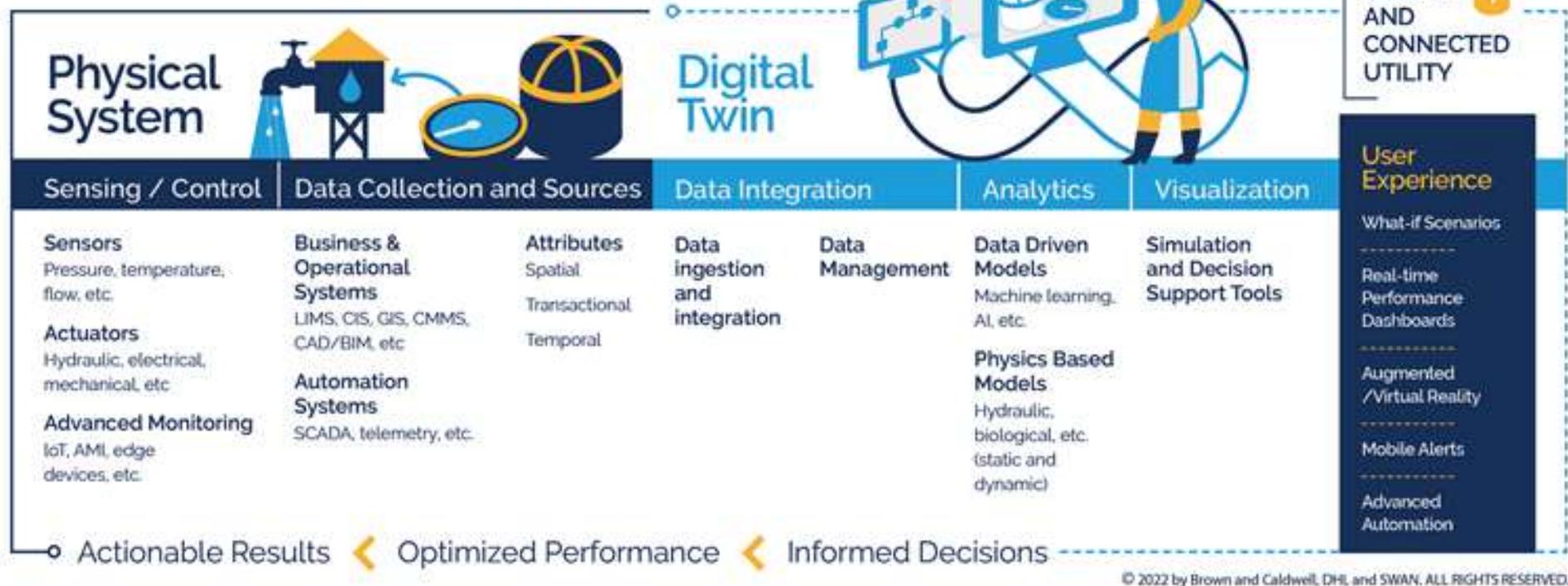
Gemelos Digitales



SECURE AND CONNECTED UTILITY

User Experience

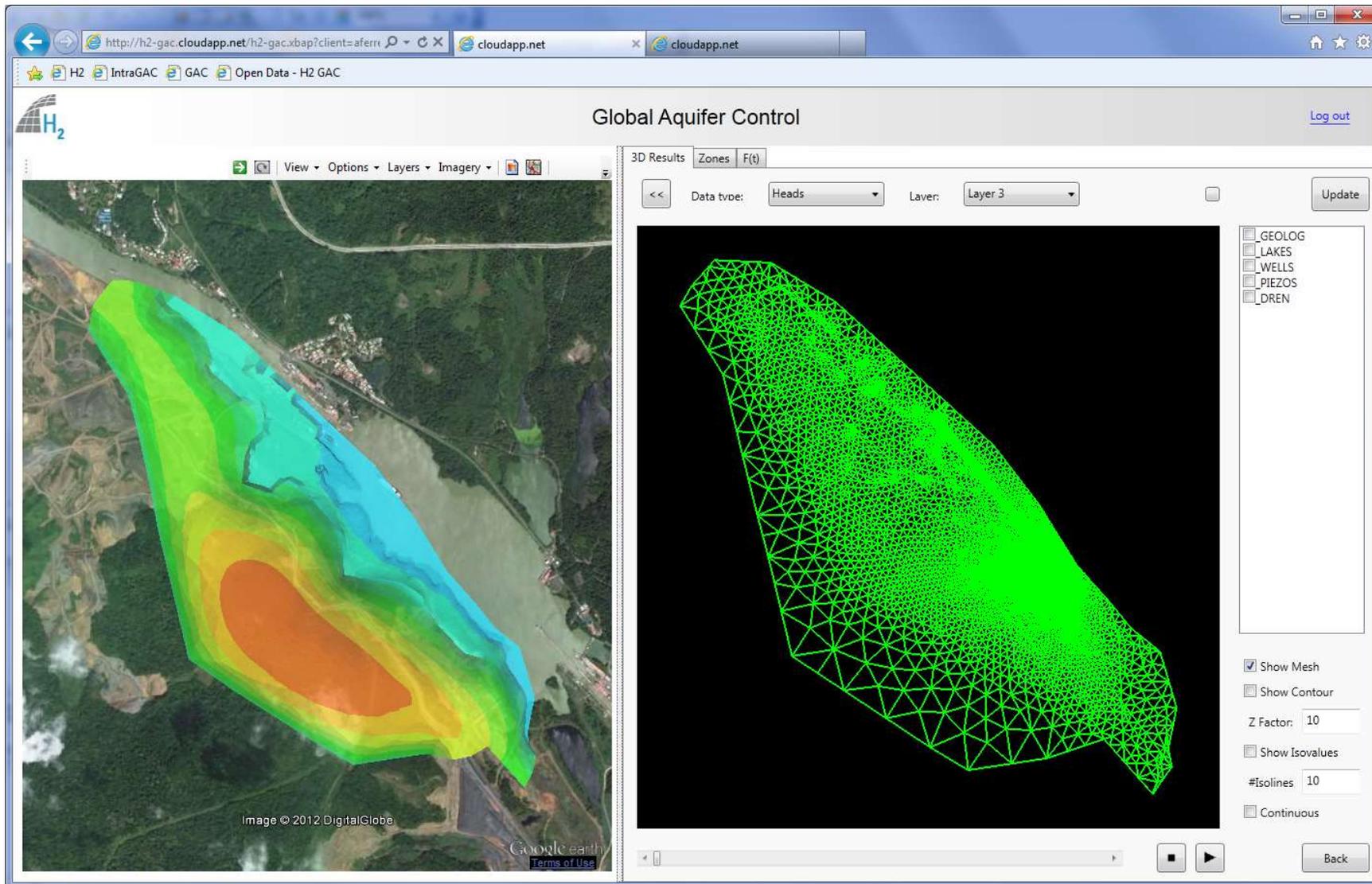
- What-if Scenarios
- Real-time Performance Dashboards
- Augmented/Virtual Reality
- Mobile Alerts
- Advanced Automation



Réplica digital, **dinámica y actualizada** de una entidad física:
Una réplica virtual que se mantiene “viva” y siempre actualizada gracias a los datos y la información que se le incorpora en tiempo real.

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

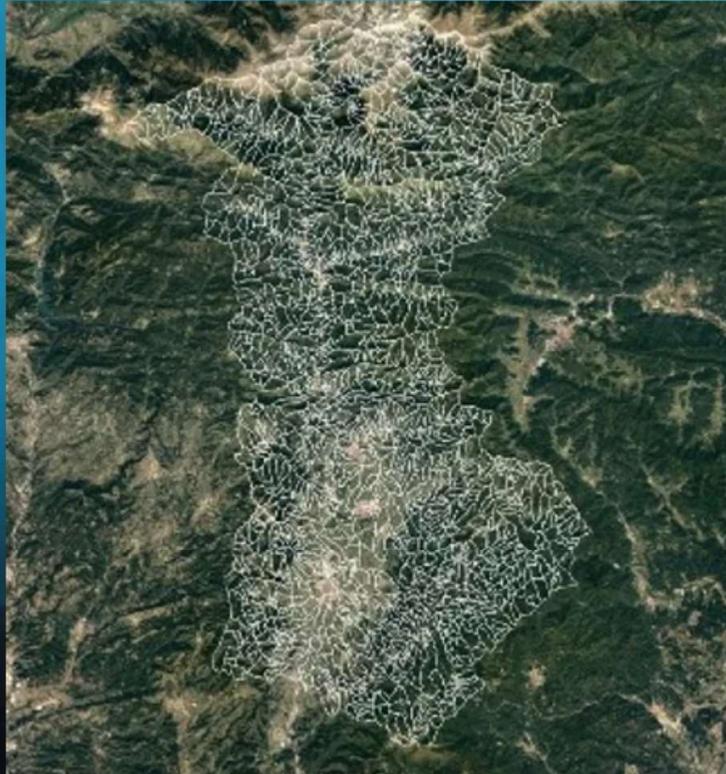
Gemelos Digitales



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Alojamiento de Gemelos Digitales en el Cloud para convertir los moldeos en Herramientas reales de Gestión

Digital Twins for Watersheds



Monitor Sensors & Results

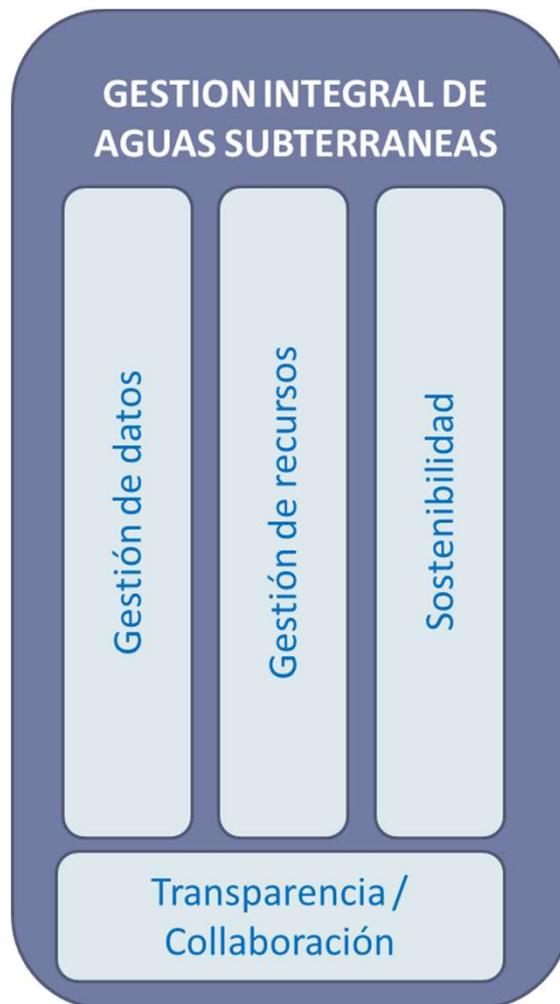
Integrate Hydrological models & Artificial Intelligence (AIBLOCKS4WATER)

Forecast Hydrological Resources

Automatic update in the cloud

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

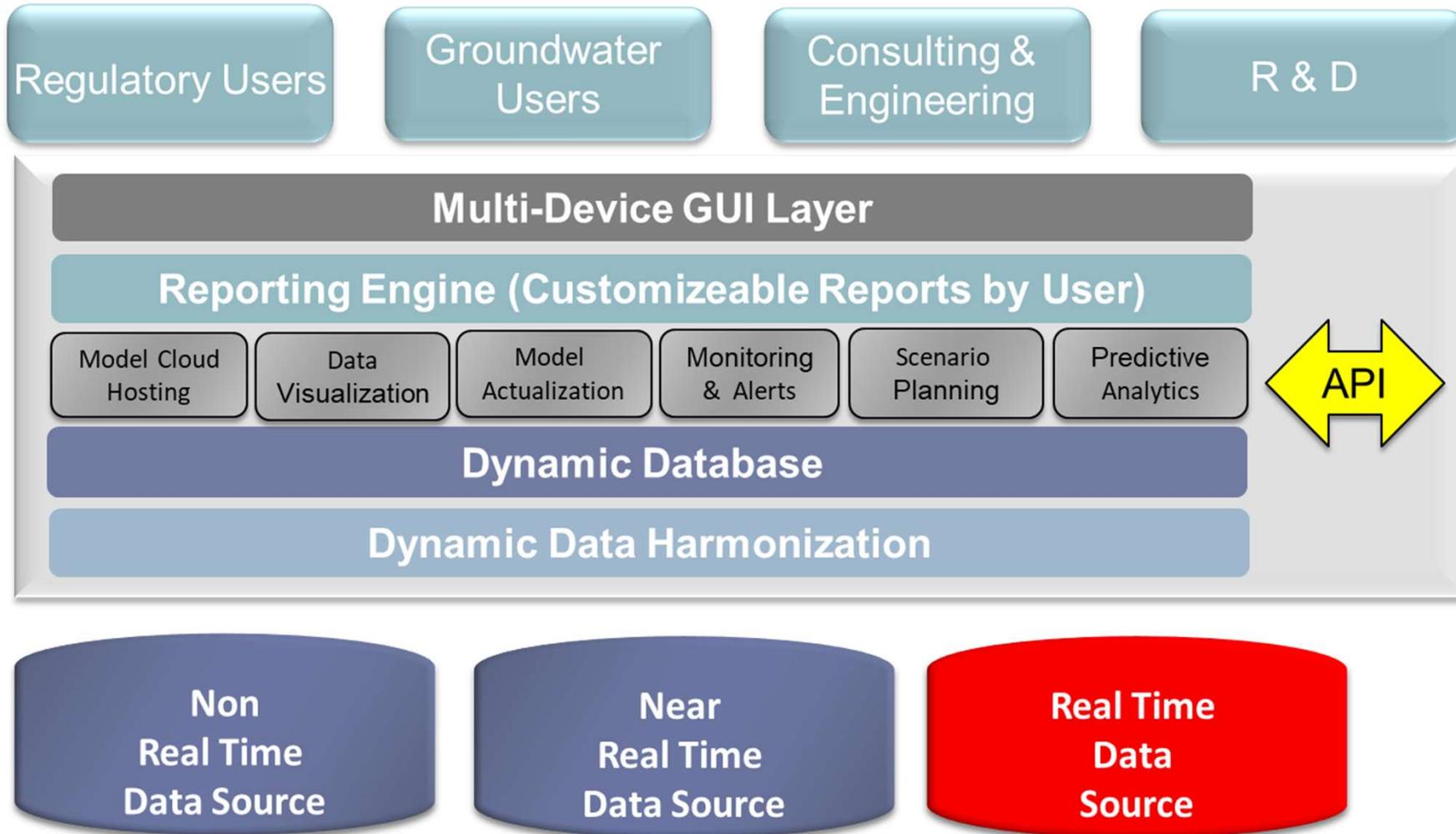
Alojamiento de Gemelos Digitales en el Cloud para convertir los moldeos en Herramientas reales de Gestión



- **Gestión de datos**
 - Acceso en tiempo real
- **Gestión de recursos**
 - Actualización automática del modelo
 - Gestión de balance
 - Discrepancias con los resultados del modelo
- **Sostenibilidad del recurso**
 - Escenarios "What-if"
 - Análisis de sensibilidad
- **Transparencia / Colaboración**
 - Fuentes de datos homogeneizadas
 - Sistema compartido de soporte a decisiones

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

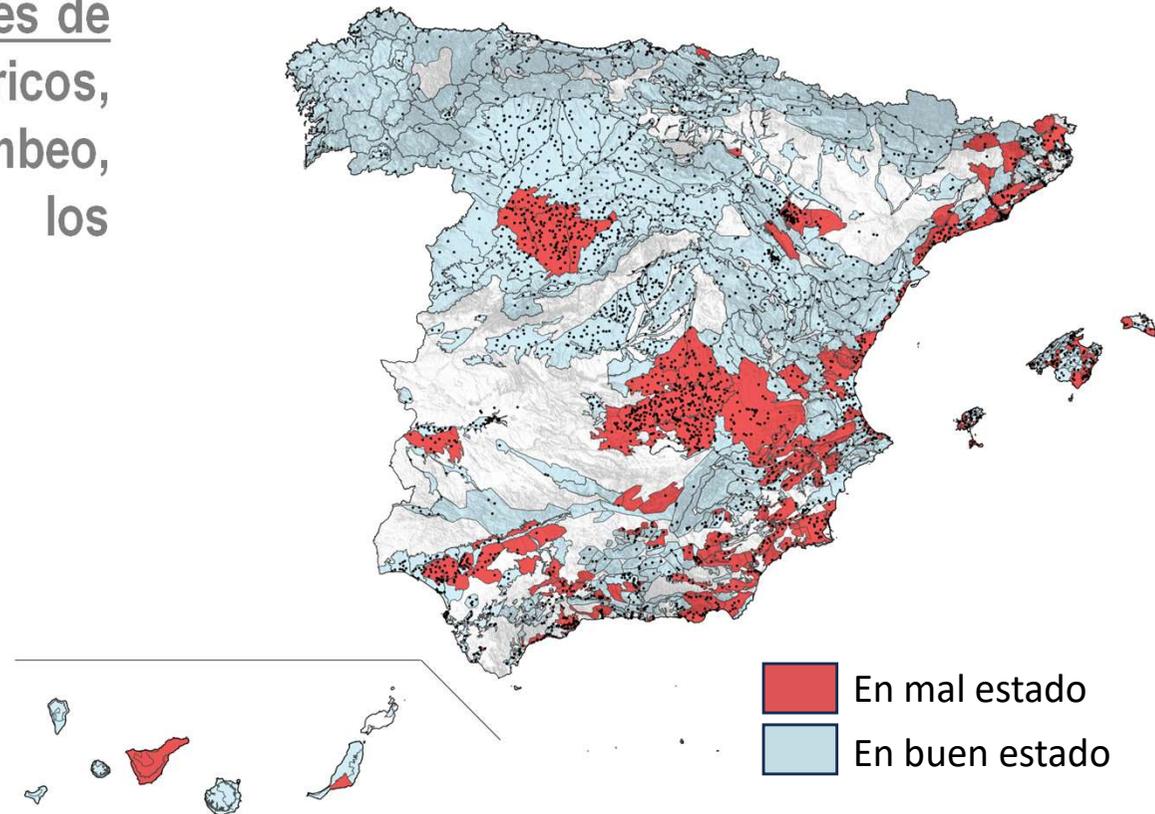
Alojamiento de Gemelos Digitales en el Cloud para convertir los moldeos en Herramientas reales de Gestión



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Gemelos Digitales como Herramientas reales de Gestión AASS

Desarrollo y Mantenimiento de redes de observación (Niveles Piezométricos, Concentraciones, caudales de bombeo, caudal de ríos) que alimenten los modelos

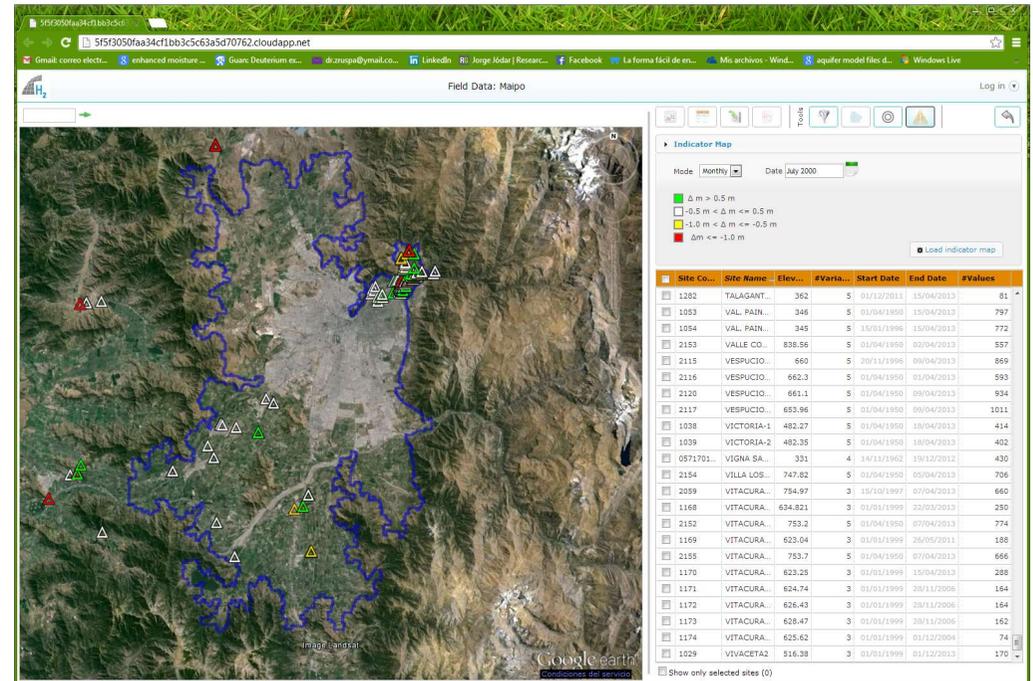
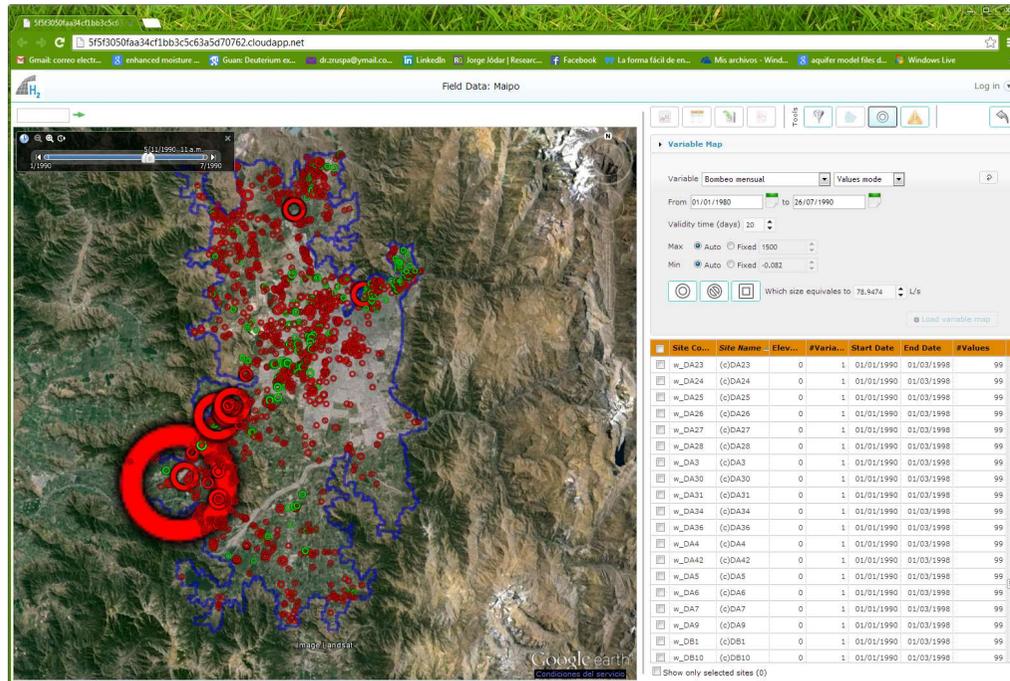


Localización de los piezómetros y situación cuantitativa de las masas de agua subterránea. Fuente: MITECO, CC.HH.

Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Gemelos Digitales como Herramientas reales de Gestión AASS

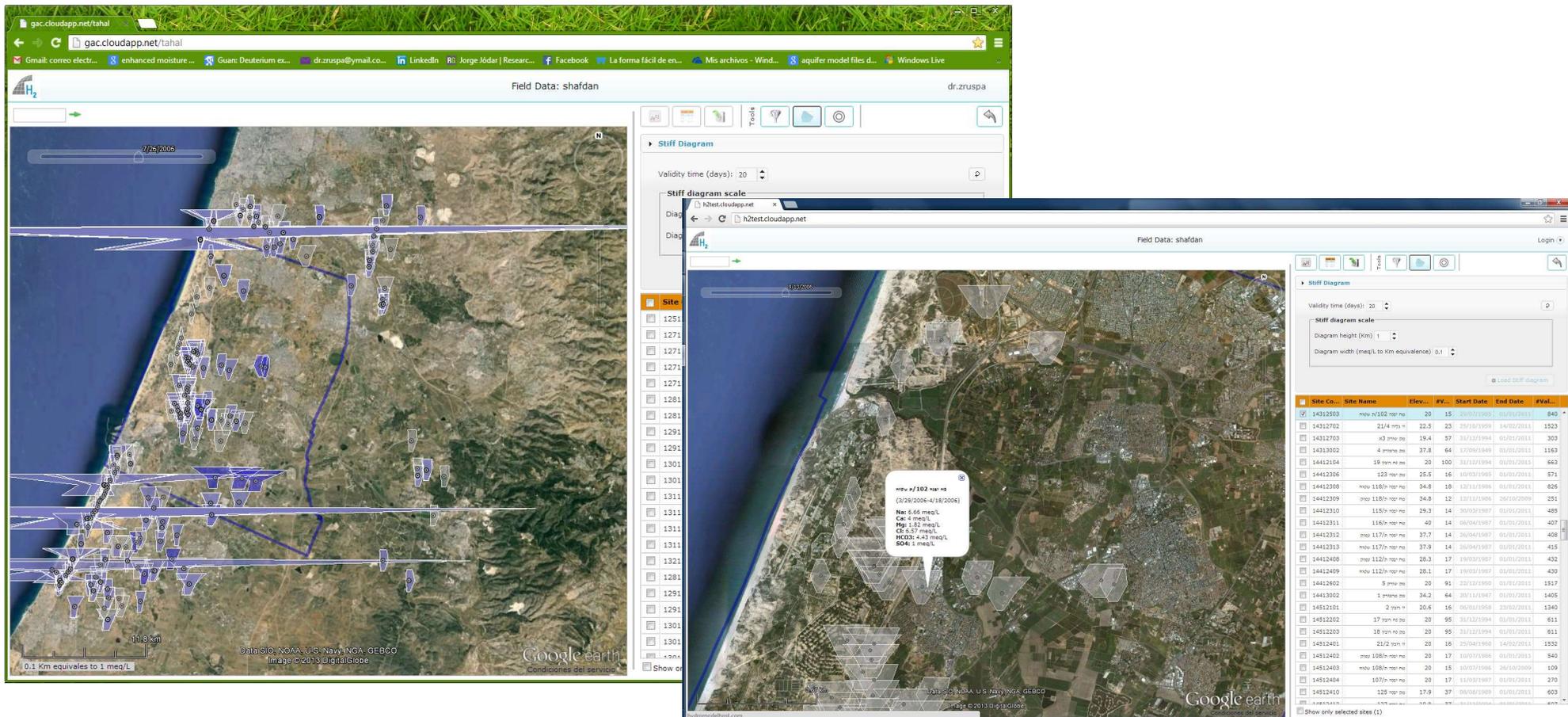
Convertir los datos en información
(Chile – Auífero del Maipo-Mapocho)



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Gemelos Digitales como Herramientas reales de Gestión AASS

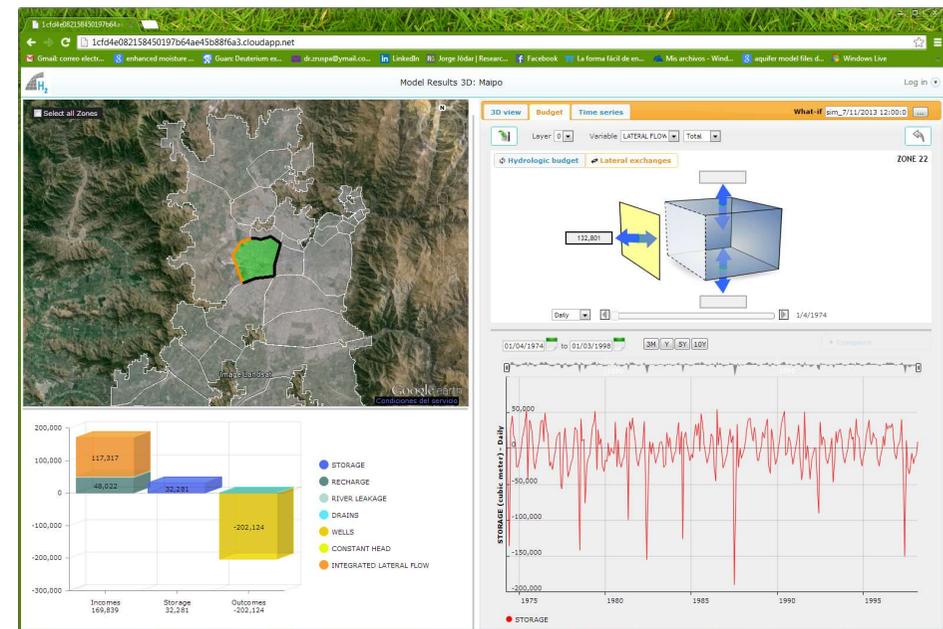
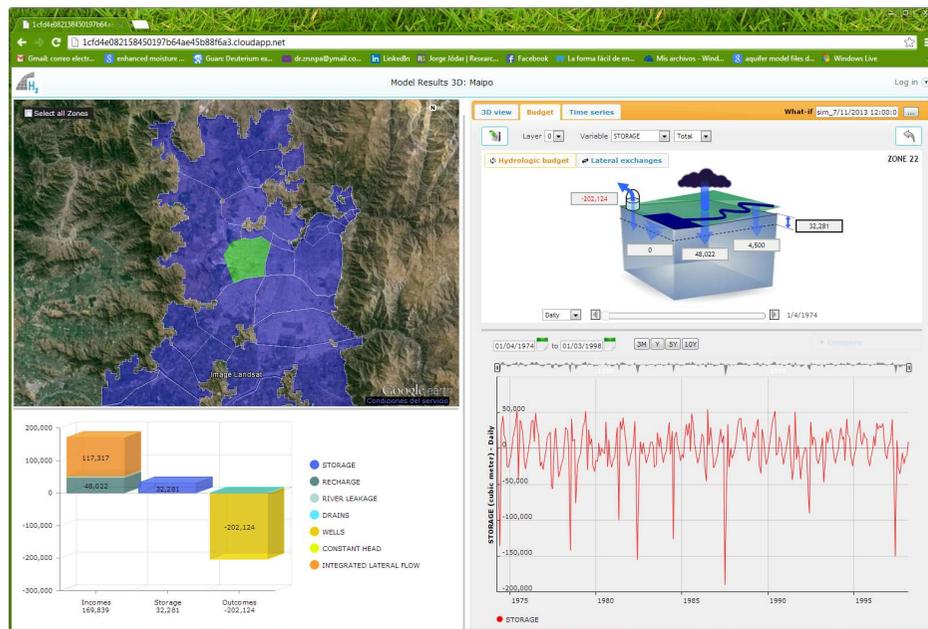
Entender la respuesta del acuífero ante un escenario de recarga artificial (Oriente Medio – Recarga del acuífero de Shafdan)



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Gemelos Digitales como Herramientas reales de Gestión AASS

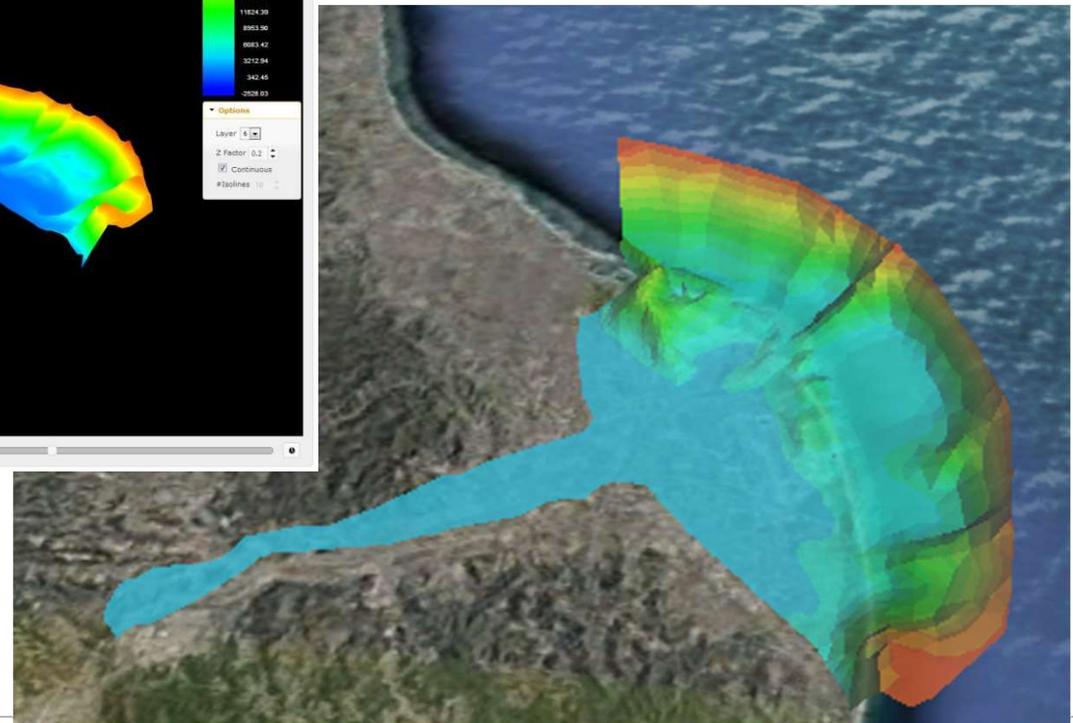
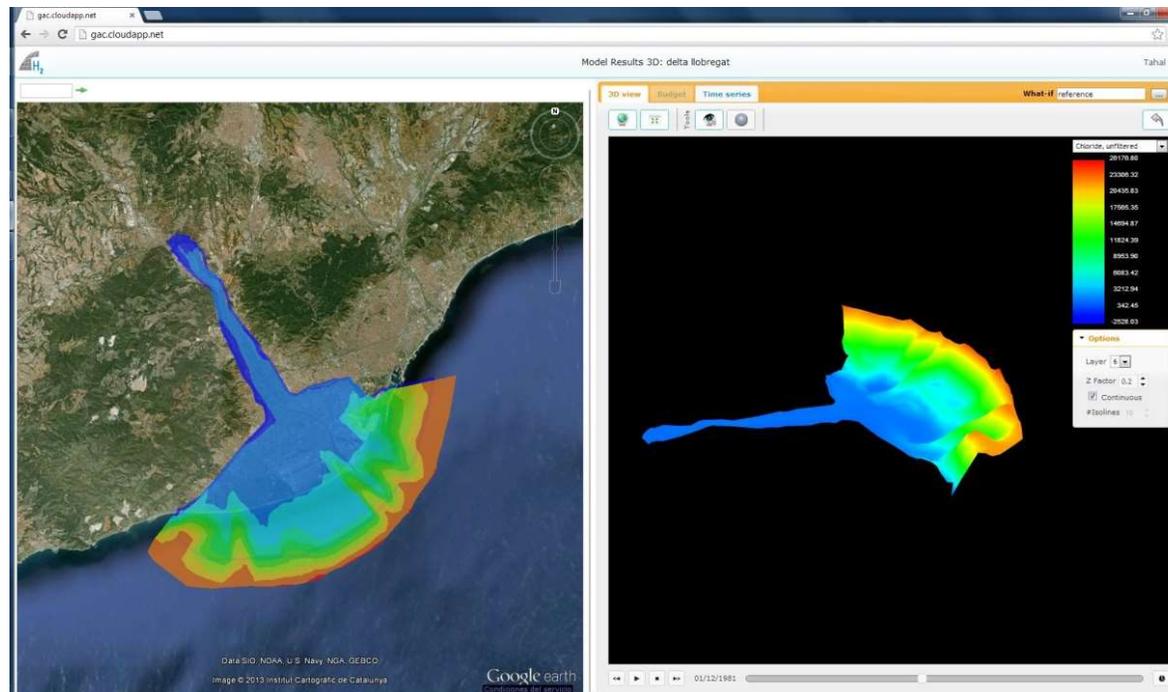
Obtención del máximo nivel de extracciones para que el acuífero sea sostenible a largo plazo (Chile – Acuífero Maipo-Mapocho)



Modelación Numérica de Aguas Subterráneas: ¿A dónde vamos?

Gemelos Digitales como Herramientas reales de Gestión AASS

Determinar el impacto de una barrera hidráulica
(España – Delta del Llobregat)



CONCLUSIONES

Los gemelos digitales **facilitan la gestión real**

- La actualización automática de las series temporales de datos, evitando errores en la manipulación de datos.
- La calibración periódica del modelo
- La actualización continua de su estado en tiempo real

Los gemelos digitales **facilitan la comunicación y transparencia**

- Visualización del estado del sistema y evolución futura
- Definición de una posición institucional.
- Acceso sencillo al estudio de escenarios (¿Qué pasa si...?)

El hospedaje de gemelos digitales **reduce costes**

- Reduce la necesidad de actualización frecuente de hardware
- Alarga la vida útil de los modelos.

 **IGME** **175** AÑOS
INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA 1849-2024



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS