

# Experiencias y reflexiones acerca de la colaboración entre la CHJ y el IIAMA en la modelación numérica de las aguas subterráneas

Jornada técnica sobre la implantación del Plan de Acción de Aguas Subterráneas

Eduardo Cassiraga

Grupo de Investigación de Hidrogeología  
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente  
Universitat Politècnica de València

Madrid, 16 de abril de 2024

# Introducción

- ▶ CHJ - GH del DIHMA:

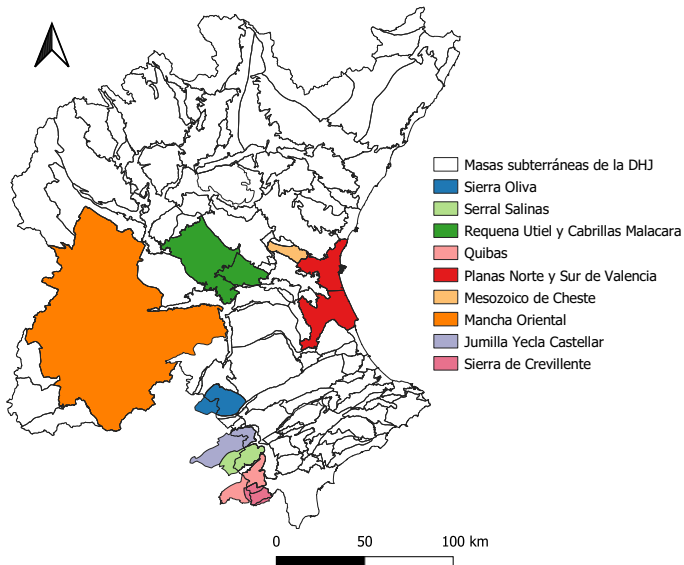
- ▶ **Andrés Sahuquillo**
- ▶ Jaime Gómez
- ▶ Javier Rodrigo
- ▶ María Elena Rodrigo
- ▶ Eduardo Cassiraga

- ▶ CHJ - GH del IIAMA:

- ▶ Jaime Gómez
- ▶ Javier Rodrigo
- ▶ María Elena Rodrigo
- ▶ Eduardo Cassiraga

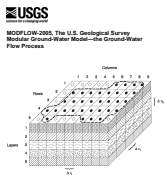


# Masas de agua subterránea modeladas

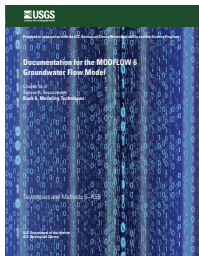


# Herramientas

- ▶ Modelos diseñados, construidos y calibrados utilizando el código MODFLOW (McDonald, M. y Harbaugh, A., 1984; Langevin y otros, 2017) y la interfaz gráfica de usuario MODEL MUSE (Winston, R.B., 2009 y 2019)

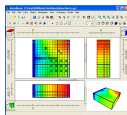


U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A10  
U.S. Department of the Interior  
U.S. Geological Survey



ModelMuse—A Graphical User Interface for MODFLOW-2005 and PHAST

By Vincent R. Swenson  
Compiled by Robert S. Harbaugh and Robert E. Mace



Techniques and Methods 6-A29

U.S. Department of the Interior  
U.S. Geological Survey



ModelMuse Version 4: A Graphical User Interface for MODFLOW 6

Scientific Investigations Report 2019-5036

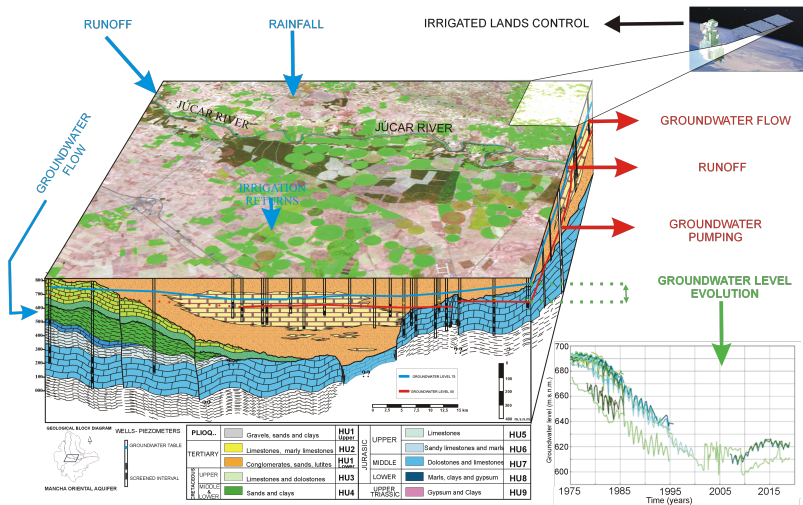
U.S. Department of the Interior  
U.S. Geological Survey





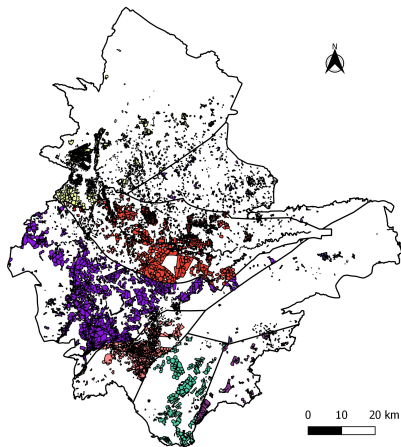
# Sistema de la Mancha Oriental

## ► Modelo conceptual:



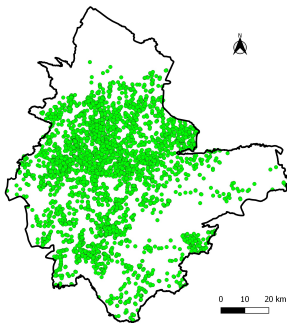
# Sistema de la Mancha Oriental

- ▶ Zonas regadas con agua subterránea en la Mancha Oriental:

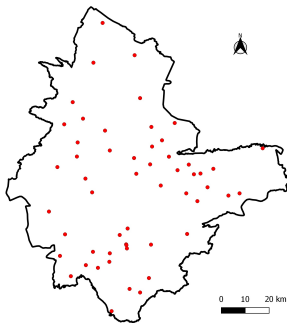


# Sistema de la Mancha Oriental

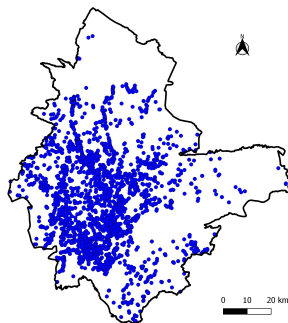
▶ Leñosos (3880):



▶ Abastecimiento (50):

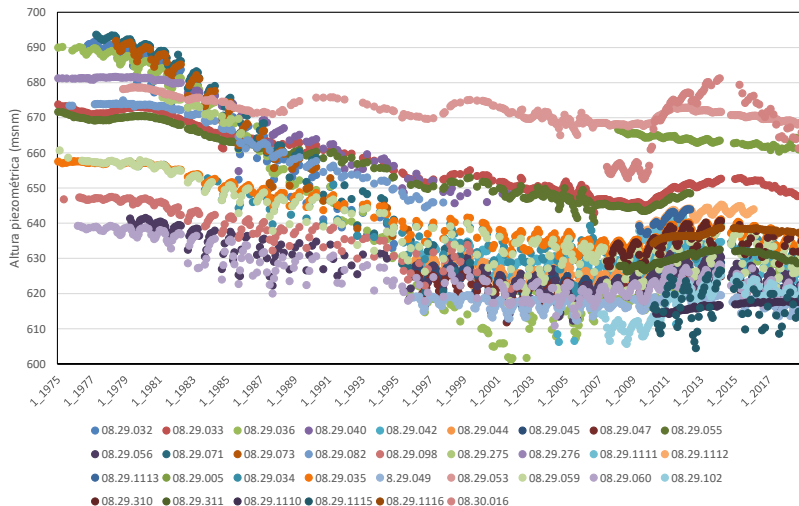


▶ Regadío (3010):



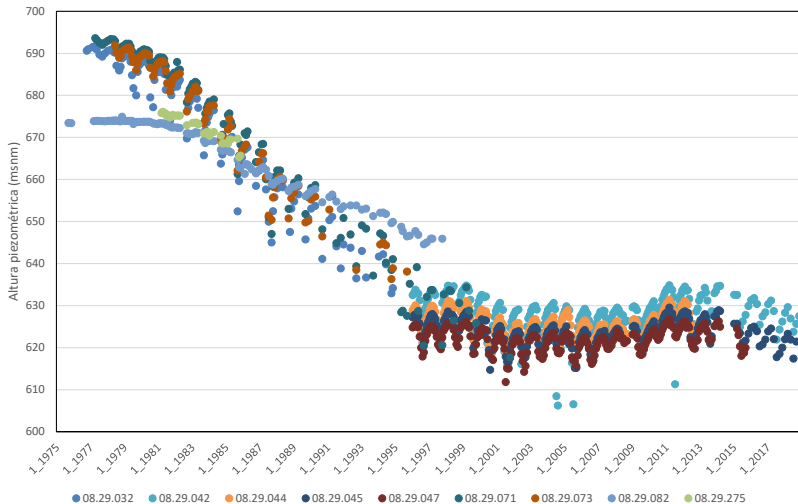
# Sistema de la Mancha Oriental

## ► Piezometría en la Mancha Oriental:



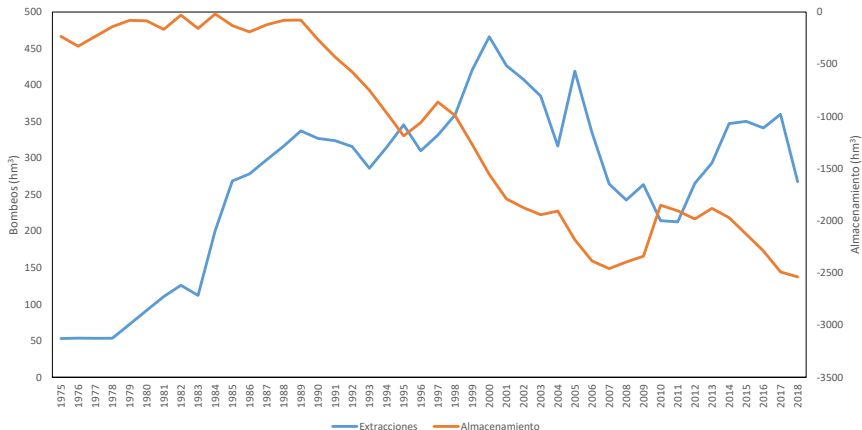
# Sistema de la Mancha Oriental

## ► Detalle de la piezometría en la Mancha Oriental:



# Sistema de la Mancha Oriental

## ► Almacenamiento vs. extracciones en la Mancha Oriental:

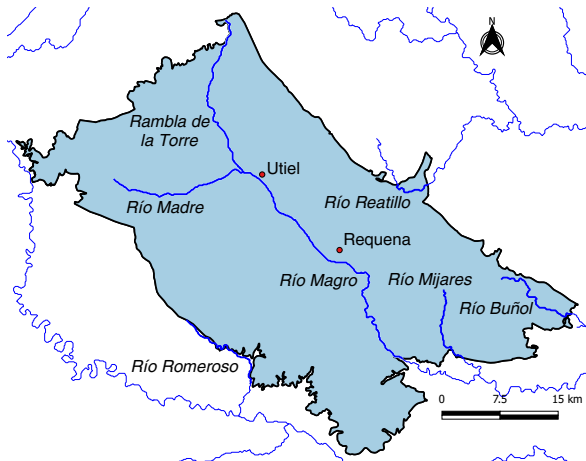


# Sistema de la Mancha Oriental

- ▶ Estudio de la relación entre el SMO y el río Júcar
- ▶ Oferta Pública de Adquisición de Derechos (OPAD)
- ▶ Sustitución de Bombeos
- ▶ Reducción de bombeos
- ▶ Relación con masas vecinas
- ▶ Escenarios de cambio climático
- ▶ ...

# Masa de Requena Utiel

## ► Características generales:

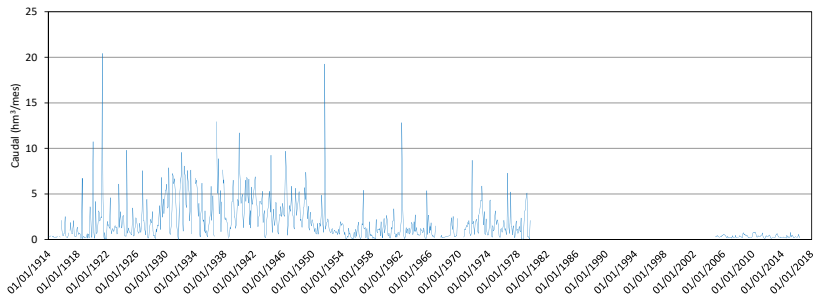




# Masa de Requena Utiel

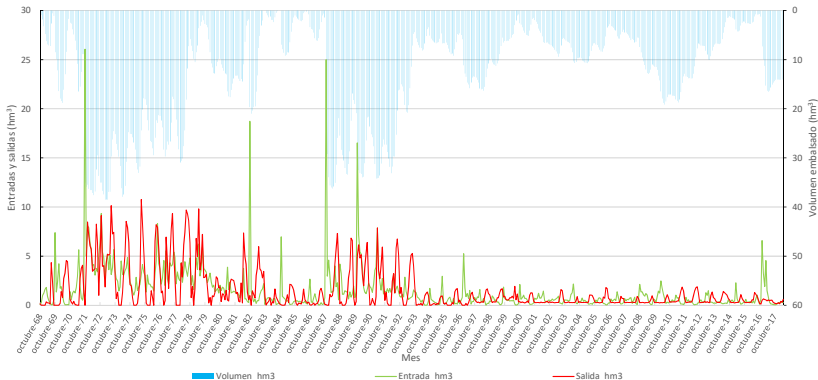
- ▶ Se aprecia una disminución de los caudales aforados pasando de una media de  $2.13 \text{ hm}^3/\text{mes}$  a una media de  $0.33 \text{ hm}^3/\text{mes}$

Caudal en la estación de aforos de Requena



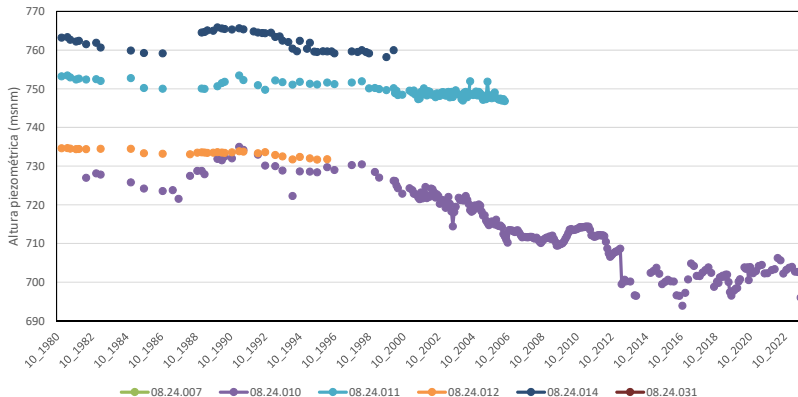
# Masa de Requena Utiel

## ► Estado del embalse de Forata:



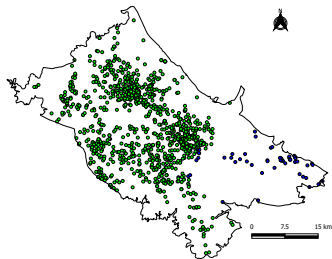
# Masa de Requena Utiel

## ► Detalle de la piezometría en Requena Utiel:

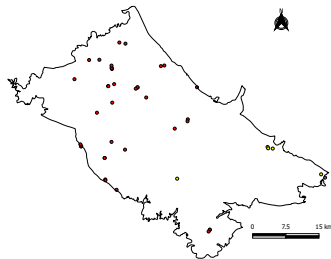


# Masa de Requena Utiel

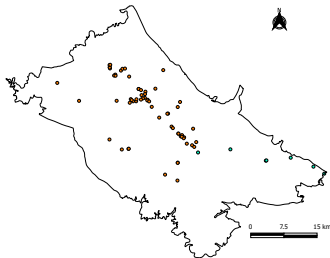
► Agrícolas (1001, 55):



► Urbanos (38, 6):

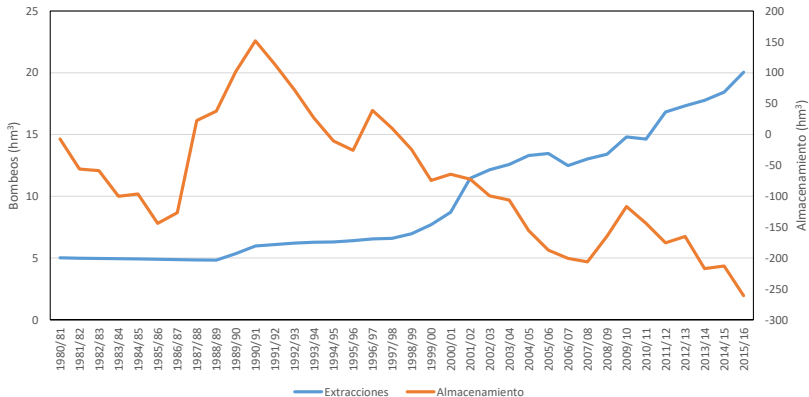


► Industriales (63, 7):



# Masa de Requena Utiel

## ► Almacenamiento vs. extracciones en Requena Utiel:

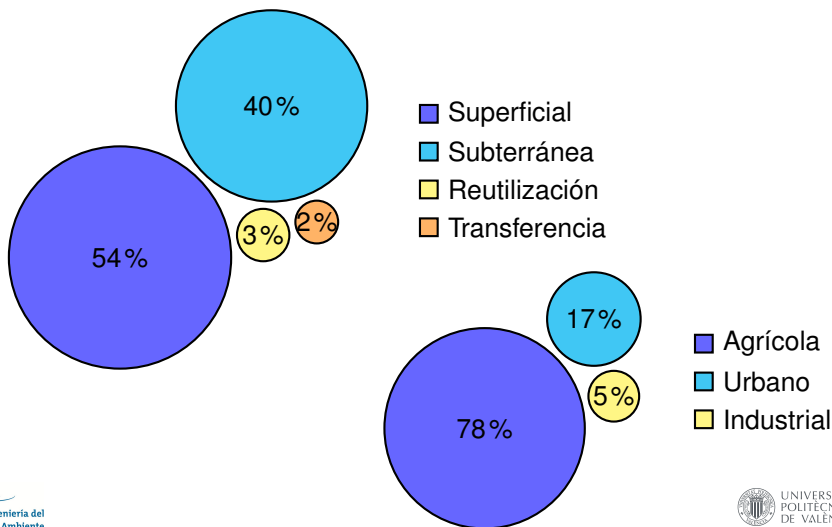


# Masa de Requena Utiel

- ▶ Estudiar la evolución del almacenamiento de la masa para confirmar/determinar su estado cuantitativo
- ▶ Estudiar la relación entre el río Magro y la masa
- ▶ Realizar simulaciones a futura en el marco del Plan de Explotación que la CHJ redactó en 2018
- ▶ ...

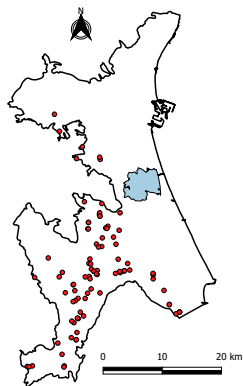
# Sistema de la Plana de Valencia

- ▶ La Comunidad Valenciana es una de las zonas de España donde **mayor uso del agua subterránea** se viene haciendo:

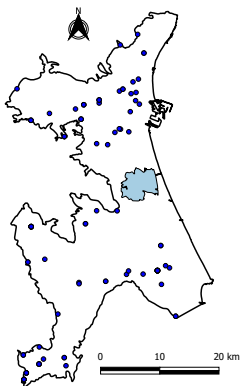


# Sistema de la Plana de Valencia

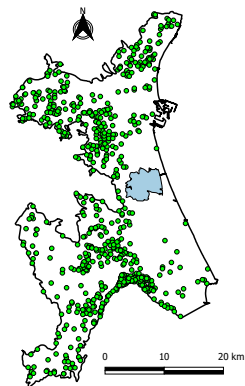
▶ Sequía (89):



▶ Urbanos (99):



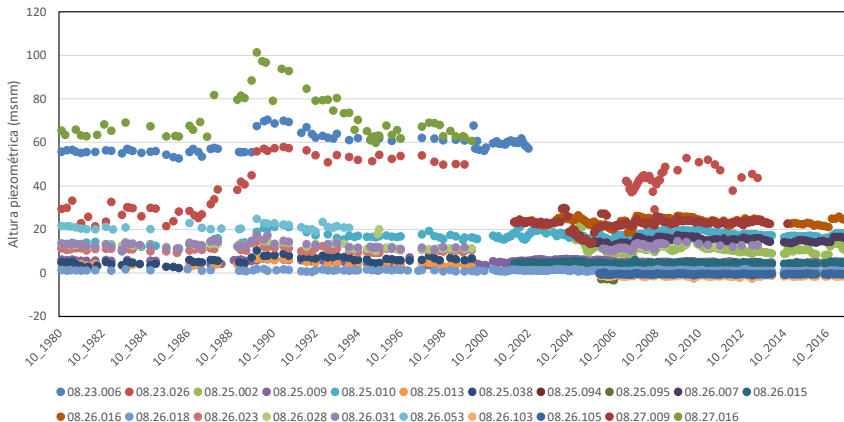
▶ Agrícolas (742):





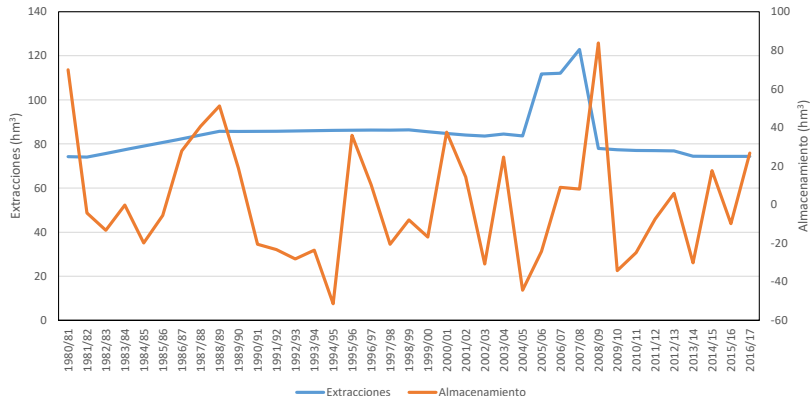
# Sistema de la Plana de Valencia

## ► Piezometría en la Plana de Valencia:



# Sistema de la Plana de Valencia

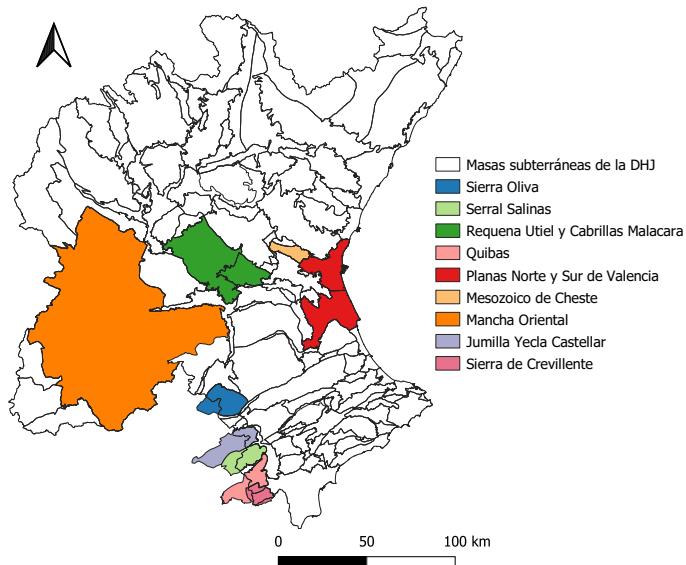
## ► Almacenamiento vs. extracciones en la Plana de Valencia:



# Sistema de la Plana de Valencia

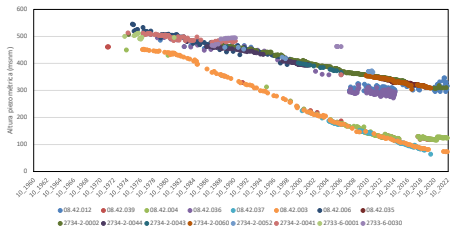
- ▶ Modelo conjunto de las dos planas
- ▶ Evaluación de las posibilidades de abastecimiento con agua subterránea a la ciudad de Valencia y su área metropolitana
- ▶ ...

# Otras masas

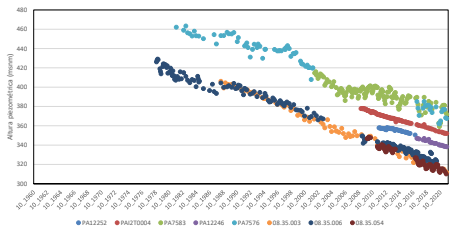


# Piezometría

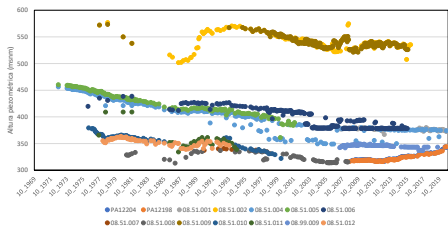
Serral Salinas



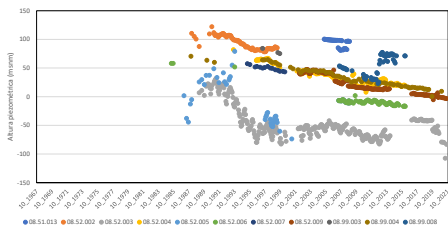
Jumilla Yecla Castellar



Quibas



Sierra de Crevillente



# Otras masas

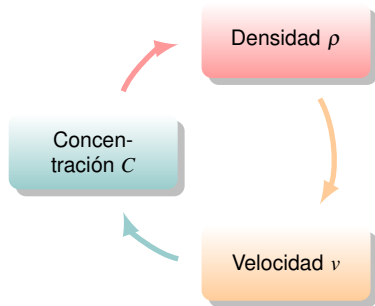
- ▶ Aprovechar los trabajos específicamente realizados por el IGME en las 5 masas compartidas con la DHS
- ▶ Contrastar los resultados con los modelos de flujo propuestos por el IGME
- ▶ Disponer de modelos más detallados para apoyar los casos en los que existan discrepancias con los planteamientos establecidos en los planes hidrológicos de cuenca
- ▶ ...

# ¿Qué estamos haciendo?

- ▶ Intrusión marina en la Plana de Valencia
- ▶ Contaminación por pesticidas en la Plana de Valencia
- ▶ Contaminación por nitratos en la Mancha Oriental
- ▶ ...

# Intrusión marina en la Plana de Valencia

- ▶ Si la **concentración de sales** varía espacialmente, la **densidad del agua** que las contiene también lo hace
- ▶ Si la **densidad del agua** cambia esto afecta a su **velocidad** y por tanto a su **movimiento**
- ▶ ¿Esto podría estar ocurriendo en el **acuífero de la Plana de Valencia**?
- ▶ Si es así, se debería considerar que los procesos de flujo de agua subterránea y transporte de masa están sujetos a condiciones de **densidad variable**



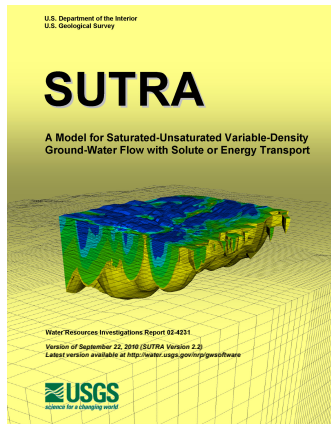
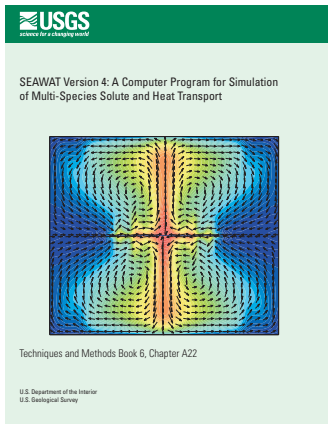


# ¿Qué deberíamos hacer?

- ▶ Caracterizar el **potencial hidráulico** de la masa de agua:
  - ▶ Red de **piezómetros**
- ▶ Caracterizar la **salinidad de la masa de agua**:
  - ▶ Medidas directas en muestras de agua, **contenido de cloruros**
  - ▶ Medidas indirectas a partir de **una estimación en función de la conductividad eléctrica**
- ▶ Delinear la **posición de la interfaz agua dulce-agua salada**:
  - ▶ Analíticamente con la **fórmula de Ghyben-Herzberg**
  - ▶ Reconocimientos **geofísicos de superficie**: métodos eléctricos y electromagnéticos
  - ▶ Registros **geofísicos en sondeos**: registro de la conductividad eléctrica

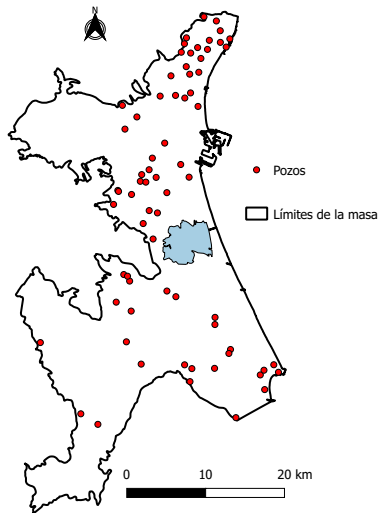
# ¿De qué disponemos?

- ▶ Códigos para considerar el flujo y el transporte bajo condiciones de densidad variable: SEAWAT (Langevin y otros, 2008) y SUTRA (Voss y Provost, 2010):



# ¿De qué disponemos?

## ► Red de intrusión de la CHJ:



- Alcalinidad total
- Bicarbonatos
- Cloruros
- Conductividad
- Nitratos
- Oxígeno disuelto
- pH
- Profundidad
- Sulfatos
- Temperatura del agua



# ¿De qué disponemos? (cloruros)

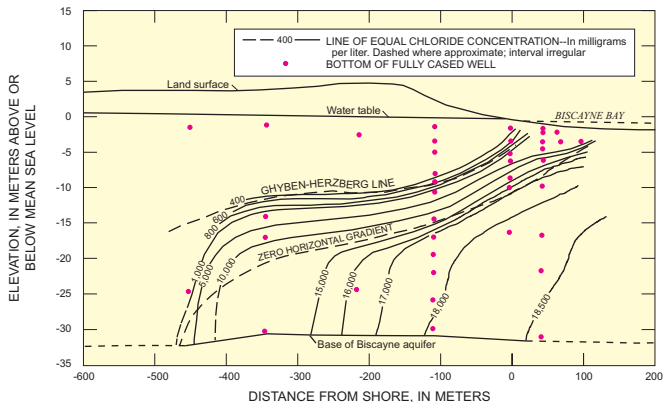
| Código           | Rango temporal      | Profundidad    | Código           | Rango temporal | Profundidad    |
|------------------|---------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| 08.22.027        | 1 (1989) y 6 (1995) |                | 08.25.062        | 1986 a 2013    | 8.91 a 12.42 m |
| 08.25.009        | 1987 a 2013         | 2.62 a 60 m    | 08.25.063        | 1986 a 2001    | 85 a 93 m      |
| 08.25.013        | 1989 a 2013         | 100 a 120 m    | 08.25.064        | 1986 a 2009    |                |
| 08.25.016        | 1982 a 1995         |                | 08.25.066        | 1987 a 1998    |                |
| 08.25.018        | 6 (1995)            |                | <b>08.25.068</b> | 1982 a 2023    |                |
| 08.25.019        | 1985 a 1995         |                | 08.25.082        | 1982 a 2013    | 6.43 m         |
| 08.25.020        | 6 (1995)            |                | 08.25.083        | 1982 a 1997    |                |
| 08.25.022        | 5 (1995)            |                | 08.25.092        | 6 (1995)       |                |
| 08.25.026        | 1987 a 2001         | 17 a 23 m      | 08.25.093        | 6 (1995)       |                |
| 08.25.027        | 1 (1989) y 6 (1995) |                | 08.26.018        | 1986 a 2013    | 2.73 a 4.1 m   |
| 08.25.029        | 5 (1995)            |                | 08.26.019        | 6 (1995)       |                |
| <b>08.25.030</b> | 1982 a 2023         | 0.77 a 40 m    | 08.26.021        | 1987 a 2012    | 27.9 a 394 m   |
| 08.25.033        | 6 (1995)            |                | 08.26.022        | 1982 a 1995    |                |
| 08.25.034        | 1982 a 2001         | 46 a 51 m      | 08.26.025        | 6 (1995)       |                |
| <b>08.25.036</b> | 1982 a 2024         | 1.55 a 26 m    | 08.26.028        | 6 (1995)       |                |
| 08.25.040        | 1983 a 2013         | 11.5 a 12.13 m | 08.26.033        | 1982 a 2001    | 56 a 88 m      |
| 08.25.043        | 6 (1995)            |                | 08.26.035        | 6 (1995)       |                |
| 08.25.046        | 1986 a 2001         | 39 a 41 m      | 08.26.036        | 1982 a 2001    |                |
| 08.25.047        | 1982 a 2001         | 120 m          | <b>08.26.037</b> | 1982 a 2023    | 1.78 a 90 m    |
| 08.25.048        | 1982 a 2001         |                | 08.26.039        | 1983 a 1995    |                |
| 08.25.050        | 1982 a 2001         | 60 m           | 08.26.040        | 1982 a 2001    | 117 a 142 m    |
| <b>08.25.051</b> | 1982 a 2024         | 33 m           | 08.26.041        | 1987 a 2000    | 41 a 42 m      |
| 08.25.052        | 6 (1995)            | 325 m          | 08.26.042        | 1982 a 1996    |                |
| <b>08.25.053</b> | 1985 a 2024         |                | 08.26.047        | 3 (1995)       |                |
| 08.25.054        | 1986 a 2013         |                | 08.26.059        | 1 (1995)       |                |
| 08.25.055        | 1985 a 2001         |                | 08.26.061        | 1982 a 2013    |                |
| 08.25.056        | 1985 a 2001         |                | 08.26.062        | 1987 a 2013    | 2.6 a 2.94 m   |
| 08.25.057        | 1982 a 2001         |                | <b>08.26.063</b> | 1982 a 2023    | 12.75 a 1.94 m |
| 08.25.058        | 1982 a 1995         |                | 08.26.070        | 1982 a 2013    | 1.3 a 2.1 m    |
| 08.25.059        | 1982 a 2001         |                | 08.27.043        | 1986 a 2001    |                |
| 08.25.060        | 1986 a 2013         | 3.81 a 40 m    | 08.27.044        | 1982 a 2001    |                |
| 08.25.061        | 1986 a 2001         | 55 m           |                  |                |                |

# ¿Qué proponemos?

- ▶ Interpretar lo medido:
  - ▶ ¿Qué es lo que se ha medido?
  - ▶ ¿Cómo se ha medido?
  - ▶ ¿Cuáles son las características constructivas de los pozos?
- ▶ Programar lo que se debería medir:
  - ▶ ¿Se sigue midiendo en la red de intrusión de la CHJ?
  - ▶ Recuperar puntos de medición
  - ▶ Intentar medir en algunos transectos
- ▶ Con una adecuada caracterización de la salinidad se estaría en condiciones de plantear la **construcción de modelos numéricos del sistema bajo condiciones de densidad variable**

# Para modelos en 2D

- ▶ Perfiles transversales correspondientes a secciones verticales del acuífero:

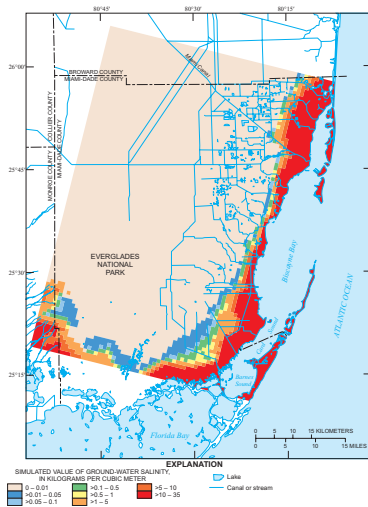


Langevin (2001)

- ▶ Podrían plantearse en régimen estacionario con unas pocas medidas a lo largo de un año

# Para modelos en 3D

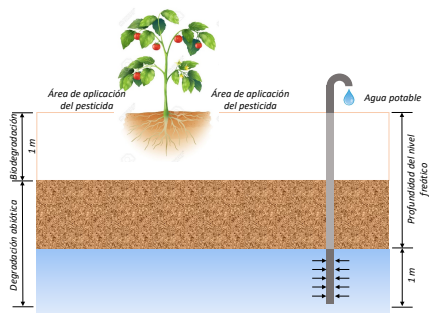
- ▶ Mapas con la concentración de cloruros a determinadas profundidades:



Langevin (2001)

# Contaminación por pesticidas en la Plana de Valencia

- ▶ **Muchos pesticidas son tóxicos** para los seres humanos y otros seres vivos, contaminan la tierra y el agua
- ▶ ¿Esto podría estar ocurriendo en el **acuífero de la Plana de Valencia**?
- ▶ Si es así, es fundamental **estudiar la dinámica de los pesticidas en el suelo**, tanto en lo que respecta a los procesos de degradación como a los de transporte



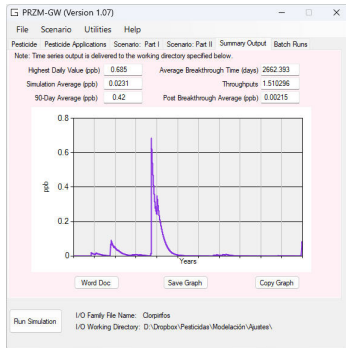
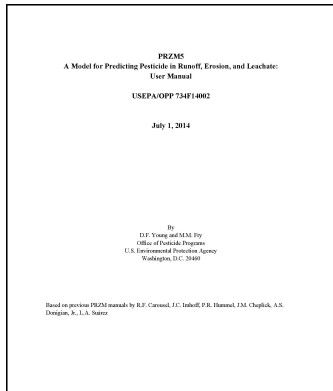


# ¿Qué deberíamos hacer?

- ▶ **Identificar los pesticidas** utilizados
- ▶ Determinar las **propiedades físicas, químicas y biológicas** de los pesticidas
- ▶ Caracterizar la **forma en que se aplica** el pesticida
- ▶ Conocer **la meteorología** de la zona de aplicación
- ▶ Caracterizar **el cultivo y el suelo** donde se aplica

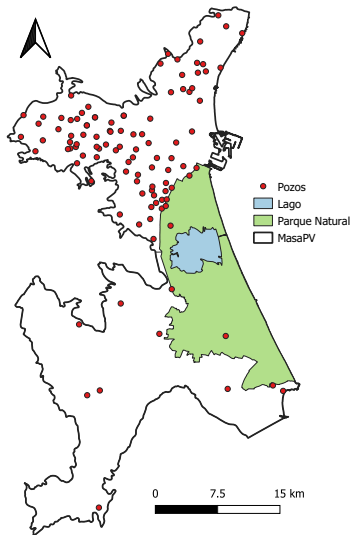
# ¿De qué disponemos?

- ▶ PRZM-GW (*Pesticide Root Zone Model Groundwater*, Young, 2014), código para la simulación a escala diaria y en una dimensión del transporte y la transformación de pesticidas en zona no saturada:



# ¿De qué disponemos?

## ► Red de calidad de la CHJ:

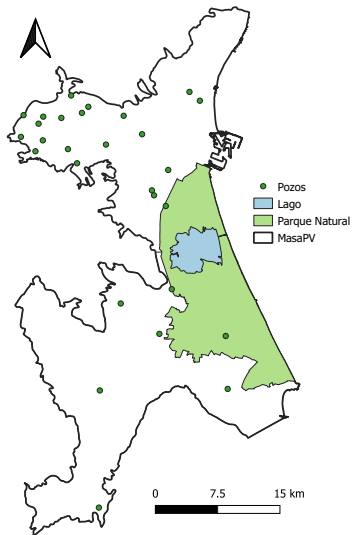


- 106 pozos de registro
- 95 en la Plana Norte y 11 en la Plana Sur



# ¿De qué disponemos?

## ► Red de calidad de la CHJ:

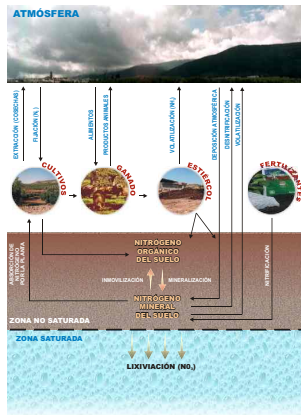


- 28 pozos con registros de Atrazina y Terbutilazina
- 21 en la Plana Norte y 7 en la Plana Sur
- Series con medidas semestrales entre 2012 y 2024



# Contaminación por nitratos en la Mancha Oriental

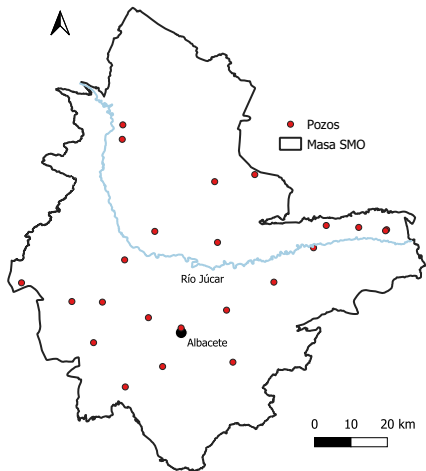
- ▶ Los retornos de riego y los vertidos localizados de aguas residuales pueden ser el vehículo de entrada de nitratos en las masas de agua subterránea
- ▶ ¿Esto podría estar ocurriendo en el **acuífero de la Mancha Oriental**?
- ▶ Si es así, corresponde **estudiar el transporte de los nitratos en el suelo y el acuífero**



Fernández-Ruiz, L. (2007)

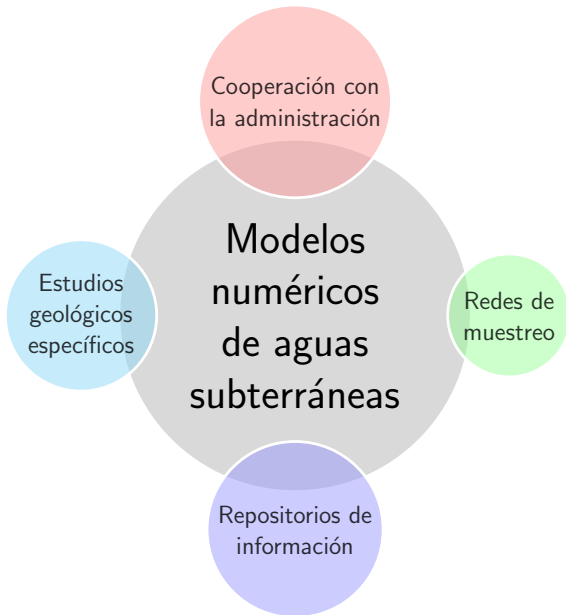
# ¿De qué disponemos?

## ► Red de calidad de la CHJ:



- 23 pozos de registro
- 17 cuentan con medidas de nitratos
- Series con medidas semestrales entre 2012 y 2024

# Reflexiones finales



# Referencias



Fernández-Ruiz, L.

*Los nitratos y las aguas subterráneas en España.*

Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2007. (15.3) 257-265, I.S.S.N.: 1132-9157, 2007.

<https://doi.org/10.3133/sir20195036>



Langevin, C.D.

*Simulation of ground-water discharge to Biscayne Bay, Southeastern Florida.*

USGS Water-Resources Investigations Report 00-4251. USGS, 2001.



Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, W.

*SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport.*

U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39 p., 2008.



Langevin, C.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, Sorab, and Provost, A.M.

*Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model.*

U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A55, 197 p., 2017.

<https://doi.org/10.3133/tm6A55>.



McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W.

*A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.*

U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875, 528 p., 1984.

<https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr83875>.





# Referencias



Voss, C. I., and Provost, A.M.

*SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport.*

U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4231, 291 p.  
2002 (Version of September 22, 2010).

[https://water.usgs.gov/water-resources/software/sutra/SUTRA\\_2\\_2-documentation.pdf](https://water.usgs.gov/water-resources/software/sutra/SUTRA_2_2-documentation.pdf)



Young, D.

*PRZM GW User's Manual.*

U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2014.



Winston, R. B.

*ModelMuse-A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST.*

Chapter 29 of Section A, Ground Water Book 6, Modeling Techniques, U.S. Geological Survey, 2009.  
<http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29/>



Winston, R. B.

*ModelMuse version 4-A graphical user interface for MODFLOW 6.*

U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019-5036, 10 p., 2019.  
<https://doi.org/10.3133/sir20195036>